

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
RAKENNUS- JA MAANMITTAUSTEKNIIKAN OSASTO

VEIKKO HENTILÄ

ROUDAN VAIKUTUSTEN MALLINTAMINEN

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 24.3.1995

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
RAKENNUS- JA MAANMITTAUSTEKNIIKAN
OSASTO

TYÖN VALVOJA: PROFESSORI E. SLUNGA

TYÖN OHJAAJA: DIPLOMI-INSINÖÖRI A. PALOLAHTI

Tekijä ja työn nimi: Veikko Hentilä

Roudan vaikutusten mallintaminen

Päivämäärä: 24.3.1995

Sivumäärä: 115

Professuuri: Pohjarakennus ja maamekaniikka

Koodi: Rak-50

Työn valvoja: Professori E. Slunga

Työn ohjaaja: Diplomi-insinööri A. Palolahti

Tämä työ on tehty Teknillisen korkeakoulun pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa. Tavoitteena oli tarkastella pohjamaan kevätkantavuusmoduulin määritystä ja siihen vaikuttavia tekijöitä, tutkia aikaisemman jännitystilaan perustuvan mallin toimivuutta kevätkantavuuskertoimen määrittämisessä sekä tarkentaa mallin parametrien määritystä. Lisäksi tavoitteena oli CBR-kokeen käyttömahdollisuuksien selvittäminen sekä roudan syvyyden ja routanousun arviointiin käytettyjen menetelmien kelpoisuuden tarkastelu.

Tutkimuksessa on käytetty hyväksi aikaisemmista töistä saatuja tuloksia, joita on täydennetty kuudessa eri kohteessa. Täydentävien tutkimuskohteiden pohjamaanäytteistä on tehty luokitusominaisuuksien ja CBR-kantavuusarvojen määritykset sekä routanousukokeet puuttuvilta osin.

Pohjamaan kantavuus alenee keväisin roudan sulamisen johdosta, koska vedellä kyllästetyn pohjamaan huokospaine kasvaa ja tehokkaat jännitykset pienenevät. Aikaisempien tutkimusten ja tämän tutkimuksen tulosten perusteella kevätkantavuuskerroin voidaan likimääräisesti arvioida maapohjassa vallitsevaan jännitystilaan perustuvan mallin avulla. Mallin toimivuutta eri olosuhteissa tulisi kuitenkin vielä tutkia.

Arvioitaessa dynaamista kantavuusmoduulia CBR-kokeen tulosten perusteella päästiin kohtalaiseen tarkkuuteen. Arvioitaessa staattista kantavuusmoduulia vastaavasti tarkkuus ei ollut yhtä hyvä.

Roudan syvyys arvioitiin parhaiten Stefanin yhtälön avulla. Routanousu arvioitiin parhaiten maan kerroksellisuuden huomioon ottavalla laskentatavalla käyttäen hyväksi in situ havainnoista saatuja segregatiopotentiaaleja.

Tilastollisilla menetelmillä tehdyt routasuureiden arvioinnit antoivat ristiriitaisia tuloksia. Menetelmät tulisi kalibroida käyttöolosuhteissa.

Author and name of the thesis: Veikko Hentilä

Modelling the effects of frost action in soils

Date: 24.3.1995**Number of pages:** 115**Professorship:** Soil Mechanics and Foundation Engineering**Code:** Rak-50**Supervisor:** Professor E. Slunga**Instructor:** MScTech A. Palolahti

The thesis have been done in the laboratory of soil mechanics and foundation engineering at Helsinki University of Technology. The purpose of this work was to study the determination of the bearing capacity of thawing subgrade and the elements affecting it, to examine the applicability of a model based on the stress state of the soil for determining the bearing capacity of a thawing subgrade and to improve the determination of the model's parameters. An additional purpose was to clarify the possibilities to use the CBR- test and to examine the applicability of some methods used to estimate the frost penetration and frost heave.

Results of previous researchworks have been taken advantage of and some completing investigations have been made in six different sites. The specimens have been used for determining the classification properties and CBR-values, as well as for conducting frost heave tests, when needed.

The bearing capacity of the subgrade decreases in spring due to the frost thaw since the pore pressure of the saturated subgrade increases and the effective stress decreases. Based on the results of this and earlier researches the elastic stiffness of thawing subgrade can be estimated roughly also by the model based on the stress state of the soil. More investigations should be made however in different conditions.

Fair accuracy was gained, when the dynamic stiffness was estimated from a CBR-value. The static stiffness was not estimated so well.

The frost penetration was estimated best by Stefan equation. The frost heave was evaluated best by the calculation which uses multi layers and in-situ segregation potentials.

The results, obtained with statistical methods, were inconsistent. Statistical methods should be calibrated in those conditions where they are going to be used.

ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty professori Eero Slungan johdolla Teknillisen korkeakoulun pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa. Tutkimuksen tilaajana ja rahoittajana on ollut tielaitoksen geokeskus, jonka edustajana on toiminut ylitarkastaja Reijo Orama. Tutkimuksen toteutuksesta ja aineiston käsittelystä on vastannut Teknillisen korkeakoulun pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorio, jossa aineiston käsittelyn on tehnyt pääasiassa allekirjoittanut. Routanousukokeet on tehty VTT:n tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratoriossa.

Tutkimus on jatkoa "Sulamispehmeneminen ja kevätkantavuus" -projektille /Gustavsson 1991 ja Palolahti et al. 1993 /, jonka tarkoituksena oli selvittää roudan sulamisen vaikutuksia maapohjan kantavuuteen ja selvittää kantavuuden määrittämiseen sopivia menetelmiä. Projektia edelsi tutkimus "Maalajien routivuuskriteerien kehittäminen" /Friberg & Slunga 1989/, jossa käsiteltiin maalajien routivuutta lähinnä routanousun kannalta.

Esitän parhaat kiitokseni professori Eero Slungalle työni valvonnasta ja saamistani neuvoista, DI Anton Palolahdelle ja ylitarkastaja Reijo Oramalle työni ohjauksesta sekä rahoittajalle tuesta, jolla tämä diplomityö on tehty.

Haluan kiittää myös pohjarakennuslaboratorion henkilökuntaa saamistani avusta ja kaikkia niitä, jotka ovat auttaneet työni valmistumista.

Espoossa 24.3.1995



Veikko Hentilä

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKULAUSE

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT

1. JOHDANTO.....	10
2. ROUTAANTUMISEN JA ROUDAN SULAMISEN FYSIKAALINEN TAUSTA.....	11
2.1 Routanousun mekanismi	11
2.2 Sulamispohkeumisen mekanismi	12
3. TUTKIMUSMENETELMÄT.....	14
3.1 Yleisperiaatteet	14
3.2 Menetelmien käyttö	15
3.2.1 Luokitus- ja hydrauliset ominaisuudet	15
3.2.2 California Bearing Ratio (CBR)-koe	16
3.2.3 Routanousukoe	17
3.2.4 Kenttäkokeet ja -havainnot	19
4. TUTKIMUSAINESTO.....	21
4.1 Aikaisemmat tutkimukset	21
4.2 Täydentävät tutkimukset	22
4.2.1 STINA-projektin tutkimuskohteet	22
4.2.2 Pohjamaan kantavuus-projektin tutkimuskohteet	22
4.2.3 Kevätkantavuusprojektin kohteet	23
5. KEVÄTKANTAVUUDEN MÄÄRITYS.....	24
5.1 Aikaisemmat tutkimukset	24
5.2 Täydentävät tutkimukset	26
5.2.1 Häiriintymättömien näytteiden otto	26
5.2.2 Kontula	27
5.2.3 Nummi-Pusula	28
5.2.4 Palojärvi-Olkkala pl 100+17	29
5.2.5 Palojärvi-Olkkala pl 114+80	29

	6
5.2.6 Palojärvi-Olkkala pl 100+40	29
5.2.7 Otaniemi	29
5.3 Pohjamaan kantavuusmoduulin määrittäminen eri menetelmillä	30
5.3.1 Kokemusperäinen kantavuusmoduulin arviointi	30
5.3.2 CBR-kokeen perusteella arvioitu kantavuusmoduuli	31
5.3.3 Moduulin määrittäminen levykuormituskokeilla	33
5.4 Kevätkantavuuskerroin	34
5.4.1 Levykuormituskokeiden tulosten perusteella lasketut kevätkantavuuskertoimet	34
5.4.2 Teoreettinen kevätkantavuuskertoimen arviointi	35
6. ROUDAN SYVYYDEN JA ROUTANOUSUN ARVIOIMINEN.....	45
6.1 Maan lämpötekniikan ominaisuuksiin ja pakkasmäärään perustuvat menetelmät	45
6.1.1 Roudan syvyyden arviointi	45
6.1.2 Routanousun arviointi	60
6.2 Tilastolliset menetelmät	71
7. TULOSTEN TARKASTELU.....	76
8. YHTEENVETO.....	81
KIRJALLISUUS.....	83
LIITTEET.....	87

MERKINNÄT

A	kerroin
\bar{B}	huokospaineparametri
B	kerroin
C	kerroin
C_{av}	maan keskimääräinen tilavuuslämpökapasiteetti, $J/m^3 K$
C_f	jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetti, $MJ/m^3 K$
C_u	sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti, $MJ/m^3 K$
C_w	veden tilavuuslämpökapasiteetti, $4.19 MJ/m^3 K$
CBR	CBR-kokeen kantavuusarvo, %
D	kerroin
D'	roudan tunkeutumisvyvyys routivassa maakerroksessa, m
E	kerroin
E	muodonmuutosmoduuli, MN/m^2
E_c	Stina-levykuormituskokeella määritetty kantavuusmoduuli, MN/m^2
E_{fwd}	pohjamaan kantavuusmoduuli pudotuspainokokeella, MN/m^2
$E_{kevät}$	kevällä määritetty kantavuus, MN/m^2
$E_{kesä}$	kesällä määritetty kantavuus, MN/m^2
$E_{1,2}$	levykuormituskokeella määritetty kantavuusmoduuli, MN/m^2
F	pakkasmäärä, Kh
H	routivan maakerroksen paksuus jäätyneenä, m
H_w	pohjaveden syvyys maanpinnasta, cm
$H_{1,2}$	pohjavedenpinnan syvyydet alkuperäisestä maanpinnasta routaantumisjakson alussa ja lopussa, m
I_p	plastisuusluku, %
L	maaperässä olevan veden jäätymislämpö, MJ/m^3
L_w	veden jäätymislämpö, $334 kJ/kg$
M_r	dynaaminen kimmomoduuli, MN/m^2
R_f	hienoustekijä, %
S	maan ominaispinta-ala, m^2/g
S_r	kyllästysaste
SP	segregaatiopotentiaali, mm^2/Kh
T	lämpötila, $^{\circ}C$
V_f	roudan tunkeutumisnopeus, cm/vrk
V_s	pakkaskauden keskilämpötila, $^{\circ}C$
V_0	vuoden keskilämpötila, $^{\circ}C$
V_{24h}	routanousunopeus 24 h aikana, mm/h
$X_{1,2}$	routarintaman syvyys routaantumisjakson alussa ja lopussa, m

a	kerroin, 1/Mpa
d	maakerroksen alkuperäinen paksuus, m
e	neperin luku
h_{\max}	kokonaisroutanousu routanousukokeessa, mm
k	indeksi
k	kerroin, $m/(Kh)^{0.5}$
kkk	kevätkantavuuskerroin
m	kerroin
n	huokoisuus
n	indeksi
n	kerroin
p	näytteen kuormitus, Mpa
p_s	standardimateriaalin kuormitus, Mpa
q	kokonaiskuorma, kPa
q	maaperän olomuodonmuutoslämpö, Wh/m ³
q_f	huokosveden jäätymisessä vapautuva lämpövuoto, W/m ²
q_i	imukuorma, kPa
q_p	routarintaman yläpuolisten maamassojen kuormitus, kPa
q_s	routarajalle imeytyneen veden jäätymisessä vapautuva lämpövuoto, W/m ²
q_w	veden jäätyislämpö, 93 Wh/kg
q_-	jäätyneen kerroksen läpäisevä lämpövuoto, W/m ²
q_+	sulastan maasta routarajalle tuleva lämpövuoto, W/m ²
sa%	savipitoisuus, %
t	aika, s
u	kokonaishuokospaine, kPa
u_0	alkutilan huokospaine, kPa
v	veden virtausnopeus pintayksikköä kohti, mm/s
w	vesipitoisuus, paino%
w_L	juoksuraja, %
w_u	jäätymättömän veden määrä, %
w_{vol}	tilavuusvesipitoisuus, %
z	syvyys, m
z_f	roudan syvyys, m

α	lämpösuhde
α	jäätymättömän veden määrä
γ_k	kerroksen k tilavuuspaino, kN/m ³
γ_w	veden tilavuuspaino, 9.8 kN/m ³
ε_r	aksiaalisen muodonmuutoksen palautuva osa
λ_{av}	maan keskimääräinen lämmönjohtavuus, W/mK
λ_f	jäätyneen maan lämmönjohtavuus, W/mK
λ_t	lämmönjohtavuuden laskenta-arvo, W/mK
λ_u	sulan maan lämmönjohtavuus, W/mK
μ	parametri
ρ_d	kuivairtitiheys, g/cm ³
ρ_w	veden tiheys, 1 g/cm ³
σ	kokonaisjännitys, MPa
σ_c	pohjamaan konsolidaatiojännitys, kPa
σ_d	deviatorinen jännitys, Mpa
σ_v	vertailujännitys, 1 kPa
σ_0	pohjamaan pinnalla vallitseva pystysuora kokonaisjännitys, kPa
Δ	muutos
Δh	kokonaisroutanousu, mm
Δh_i	in situ-jäätymisestä johtuva nousu, mm
Δh_s	segregaatoroutanousu, mm
Δt	tarkasteltava ajanjakso, h
$\Delta \sigma$	liikenteen aiheuttama lisäjännitys pohjamaan pinnalla, Mpa
Λ	lämpövakio
∇T_f	lämpötilagradientti, K/mm

1. JOHDANTO

Routiva maapohja käyttäytyy rakenneteknillisesti katsoen haitallisesti sekä jäätyessään että sulaessaan. Jäätyessään routiva maakerros imee lisävettä alemmista maakerroksista muodostaen jäälinsejä. Maahan muodostuvat jäälinssit lisäävät maan tilavuutta ja aiheuttavat routanousua. Keväällä roudan sulaessa routivan pohjamaan kantavuus on alhaisimmillaan, kun jäälinseissä oleva ylimääräinen vesi sulaa kyllästäen maapohjan. Koska sulaminen tapahtuu ensisijaisesti ylhäältäpäin, vapautuva vesi ei pääse virtaamaan rakenteesta pois, vaan jää maarakeiden huokosiin kasvattaen huokosvedenpainetta. Ylipaineesta johtuen tehokkaat jännitykset pienenevät ja maan kantavuus heikkenee merkittävästi. Sekä routanousu että keväällä ilmenevä kantavuuskato on sitä suurempi, mitä routivampi maapohja on, jos sääolosuhteet pysyvät muuttumattomina.

Tutkimus on jatkoa "Sulamispehmeneminen ja kevätkantavuus" -projektille /Gustavsson 1991 ja Palolahti et al. 1993 /, jonka tarkoituksena oli selvittää roudan sulamisen vaikutuksia maapohjan kantavuuteen ja selvittää kantavuuden määrittämiseen sopivia menetelmiä. Projektia edelsi tutkimus "Maalajien routivuuskriteerien kehittäminen" /Friberg & Slunga 1989/, jossa käsiteltiin maalajien routivuutta lähinnä routanousun kannalta.

Tutkimuksen tarkoituksena on ollut tarkastella pohjamaan kevätkantavuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä sekä tutkia edellisten töiden yhteydessä laaditun jännitystilaan perustuvan mallin soveltuvuutta kevätkantavuuden määrittämiseen. Lisäksi tutkimuksessa on tarkasteltu CBR-kokeen käyttömahdollisuuksia sekä roudan syvyyden ja routanousun arviointiin käytettyjä menetelmiä.

2. ROUTAANTUMISEN JA ROUDAN SULAMISEN FYSIKAALINEN TAUSTA

2.1 Routanousun mekanismi

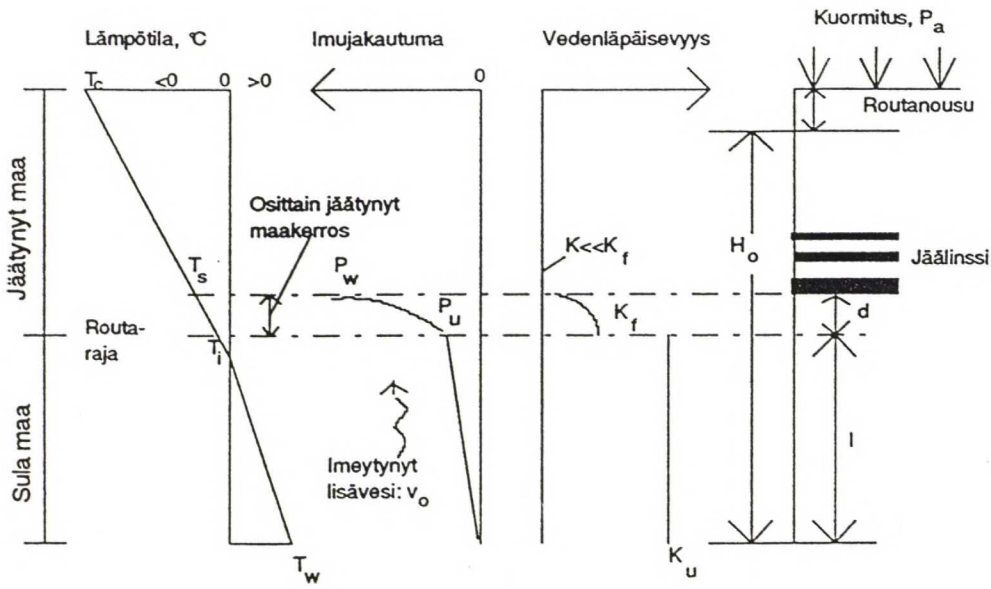
Routivan maan jäätyessä imeytyy routarintamaan vettä alemmista maakerroksista muodostaen jäälinsejä. Huokosveden ja routarintamaan tulevan lisäveden jäätyessä rakenteen tilavuus kasvaa aiheuttaen routanousua. Maarakeiden välinen huokosvesi alkaa jäätyä lämpötilassa T_i . Tämä lämpötila on huokosveden epäpuhtauden, vallitsevan jännityksen ja esimerkiksi suolapitoisuuden vuoksi hieman puhtaan veden jäätymispisteen 0°C alapuolella. Routarintaman kohdalla voidaan muodostaa lämpötasapainoyhtälö

2.1 /Miller 1972, Saarelainen 1990,1992/.

Etenkin hienorakeisilla maalajeilla lämpötilan tulee laskea tämän lämpötilan alapuolelle segregatio-jäätymislämpötilaan T_s , jotta huokosissa oleva vesi jäätyy lähes kokonaan. Lämpötilan laskiessa lämpötilasta T_i lämpötilaan T_s routarajalla vaikuttava jäätymisestä johtuva imu kasvaa huomattavasti ja lisävettä virtaa routarajalle, kunnes lämpötilassa T_s vesi on lähes kokonaan jäätynyt. Kuten kuvassa 2.1 on esitetty, syntyvä jäälinssi on jäätymiskerroksen (frozen fringe) yläpuolella /Konrad 1990/. Routarajalle imeytyvän veden virtausnopeuden ja jäätymiskerroksessa vallitsevan lämpötilagradientin välistä suhdetta kuvataan segregatiopotentialilla SP , joka määritetään joko laboratoriokokein tai in situ-havaintojen perusteella. Veden virtausnopeus jäätymiskerroksessa riippuu mm. maalajista, maakerroksen huokoisuudesta, huokosveden koostumuksesta ja vallitsevasta jännitystilasta /Konrad & Morgenstern 1980, 1981, 1982/.

$$q_- = q_+ + q_f + q_s \quad (2.1)$$

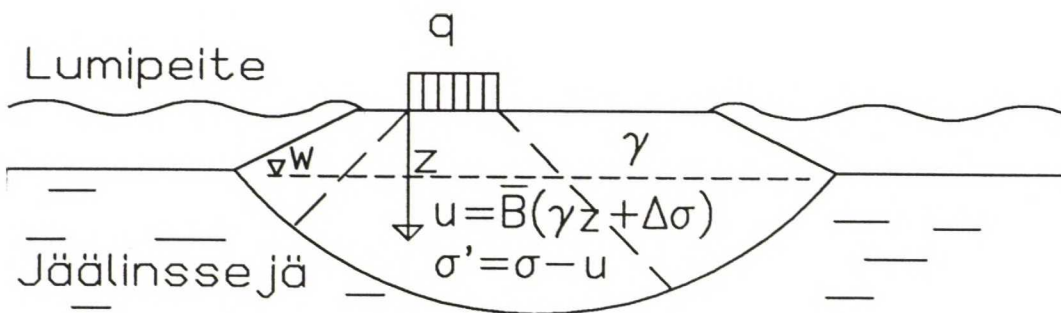
q_- on	jäätyneen kerroksen läpäisevä lämpövuoto, W/m^2
q_+	sulasta maasta routarajalle tuleva lämpövuoto, W/m^2
q_f	huokosveden jäätymisessä vapautuva lämpövuoto, W/m^2
q_s	routarajalle imeytyneen veden jäätymisessä vapautuva lämpövuoto, W/m^2



Kuva 2.1. Kaaviokuva jäätyismekanismista /Konrad 1990/.

2.2 Sulamispehmenemisen mekanismi

Roudan sulaessa ensisijaisesti ylhäältäpäin vapautuva vesi ei pääse virtaamaan rakenteesta pois, vaan jää maarakeiden huokosiin kasvattaen huokosvedenpainetta. Koska maakerroksen kantavuus on riippuvainen maarakeiden välisestä tehokkaasta jännityksestä, se pienenee maassa olevan ylimääräisen huokosveden johdosta. Kantavuus on heikentynyt kunnes routimisen aikana maakerrokseen tullut vesi on päässyt virtaamaan pois. Muodostuvaan huokospaineeseen vaikuttavat pohjamaassa vallitsevien olosuhteiden lisäksi ilman lämpötila ja sen muuttumisnopeus. Kelirikkoajan pituus riippuu suurelta osin kuivatusolosuhteista (kuva 2.2).



Kuva 2.2. Kaaviokuva rakenteen sulamispehmenemisestä.

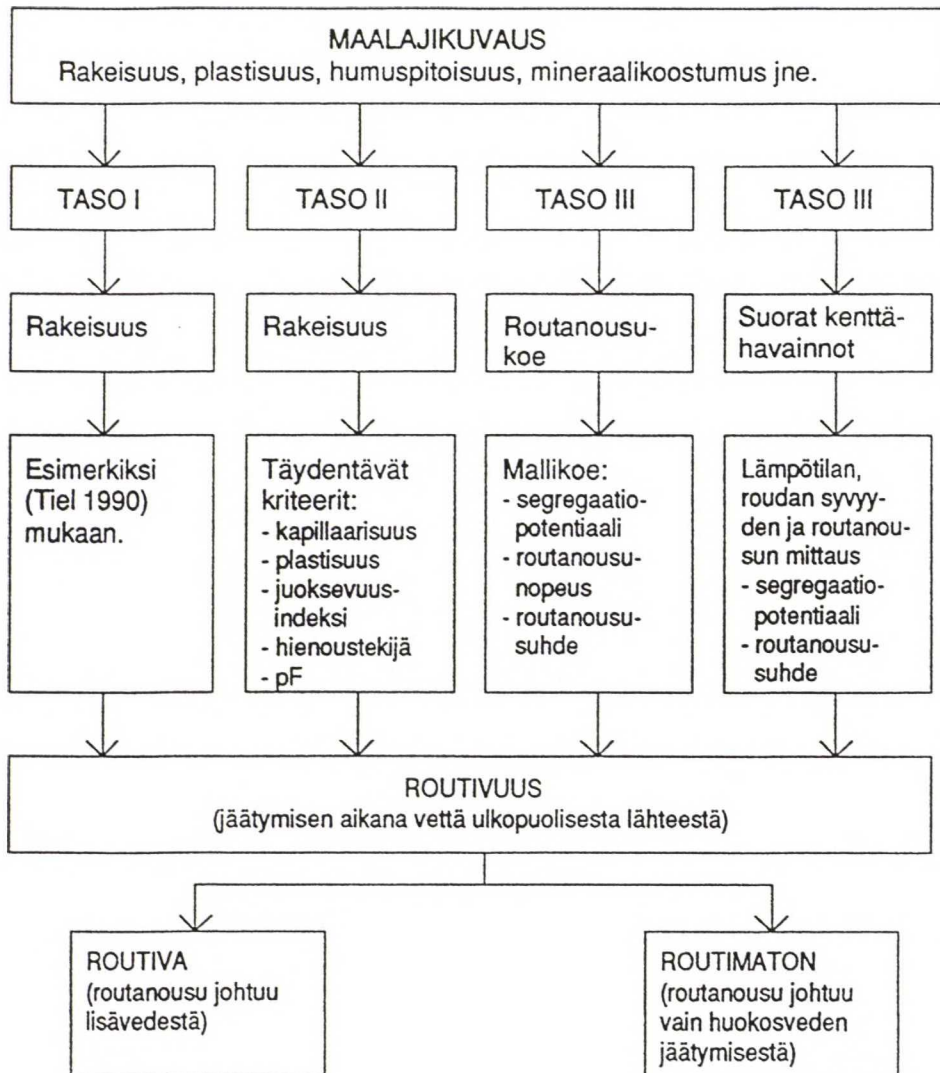
Rakennekerroksen ollessa täysin vedellä kyllästynyt hetkellinen lisäkuorma (esimerkiksi liikennekuorma) ei lisää lainkaan tehokasta- eli rakeiden välistä jännitystä, vaan kuormituslisäys siirtyy kokonaisuudessaan huokospaineeksi. Tällöin huokospaineen voidaan olettaa olevan maassa vallitsevan kokonaisjännityksen suuruinen. Osittain kyllästetyssä maassa huokospaineparametrin \bar{B} arvo on pienempi kuin 1. Huokosveden ylipaine sulamisvyöhykkeessä on verrannollinen kokonaispystyjännitykseen ja kääntäen verrannollinen sulamistekijään /Nixon & Morgenstern 1971/.

3. Tutkimusmenetelmät

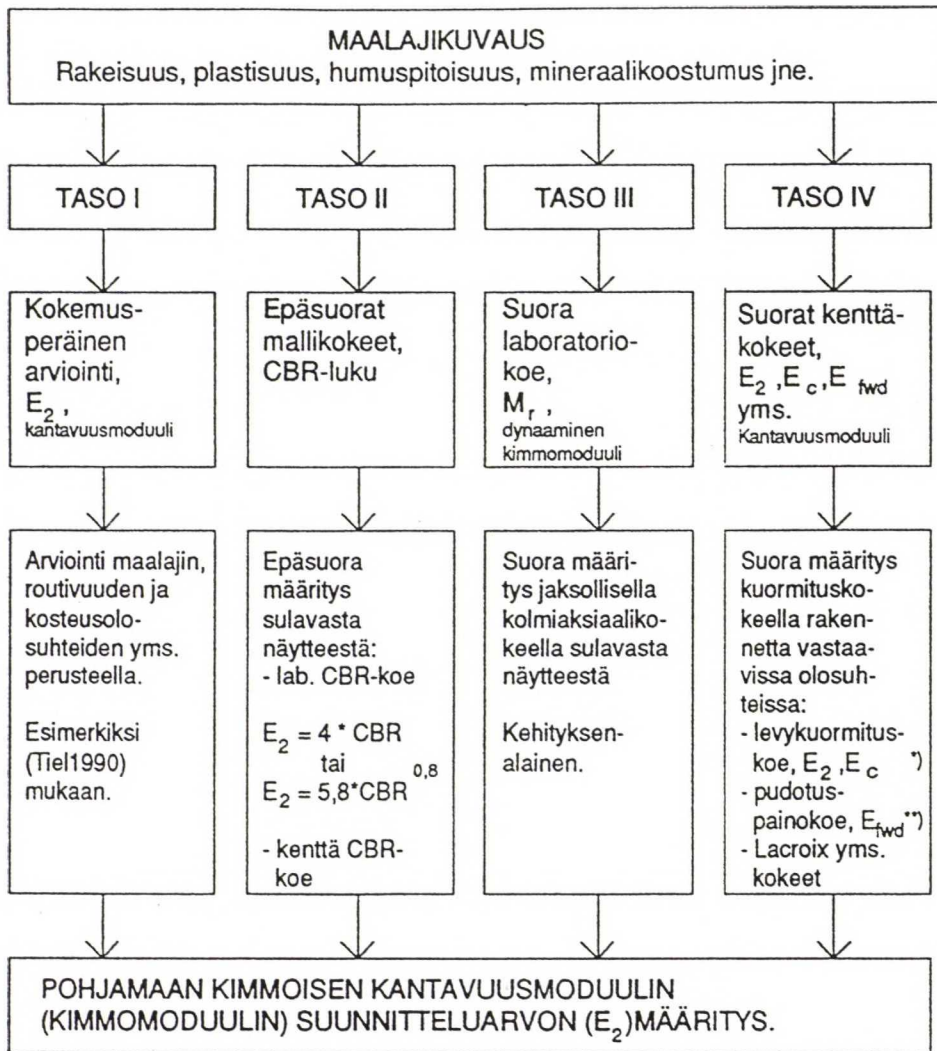
3.1 Yleisperiaatteet

Maapohjan routivuutta ja kantavuutta voidaan arvioida kohteen vaativuuden ja käytettävissä olevien resurssien mukaan eritasoisilla menetelmillä.

Maan routivuuden arviointi on esitetty jaettavan kuvan 3.1 /ISSMFE 1989/ mukaisesti kolmeen eri tarkkuustasoon. Vastaavasti maapohjan kevätkantavuuden arviointi on esitetty jaettavan kuvan 3.2 /ISSMFE 1993/ mukaisesti neljään tasoon.



Kuva 3.1. Maalajien routivuuden arviointimenetelmät /ISSMFE 1989/



*) Sulan maan aikana mitattu kantavuusmoduuli kerrotaan kevät-kantavuuskertoimella (kkk).

**) Pudotuspainolaitteen käyttö kevät-kantavuuden määrittämiseen edellyttää vielä kehitystyötä.

Kuva 3.2. Maapohjan kevät-kantavuuden arviointimenetelmät /ISSMFE 1993/.

3.2 Menetelmien käyttö

3.2.1 Luokitus- ja hydrauliset ominaisuudet

Yksinkertaisimmin maapohjan routivuutta voidaan arvioida rakeisuuden perusteella (taso I). Kyseeseen tulevat kohteet, jotka eivät ole roudalle kovin herkkiä kuten esimerkiksi tierakenteet. Tällöin routivuuden voimakkuutta ei voida arvioida.

Rajatapauksissa ja suurempaa tarkkuutta vaativissa kohteissa maalajin rakeisuuteen perustuvaa luokitusta tarkennetaan täydentävillä kriteereillä kuten kapillaarisuus, plastisuus jne. (taso II).

Tasolla I alusrakenteen kantavuus arvioidaan pohjamaan maalajin ja rakeisuuskäyrän avulla määritetyn routivuuden sekä paikallisten kosteusolosuhteiden perusteella. Tielaitoksen käyttämässä menetelmässä /Tiel 1990/ alusrakenne on jaettu seitsemään eri kantavuusluokkaan (A - G), joissa kantavuus on vaihdellen 5 ... 300 MN/m². Jakoa on täsmennetty savimailla ottamalla huomioon saven suljettu leikkauslujuus.

3.2.2 Californian Bearing Ratio (CBR)-koe

Laboratorio CBR-kokeessa näytettä, jonka halkaisija on 150 mm ja korkeus on 125 mm, puristetaan Ø50 mm männällä vakionopeudella 1.25 mm minuutissa. Mäntään kohdistuva jännityspaine havaitaan 0.63, 1.25, 1.88, 2.5, 3.75, 5.0, 6.25, 7.5, 10, ja 12.5 mm painuman kohdalla. Näin saatua kuvaajaa verrataan ns. standardimateriaalin kuvaajaan. CBR- lukuna ilmoitetaan prosentteina koestetun materiaalin kantavuuden suhde standardimateriaalin kantavuuteen painumilla 2.5 mm ja 5 mm (kaava 3.1). Standardimateriaalin edellisiä painumia vastaavat kuormat ovat 7.0 MPa ja 10.45 MPa /SNV 670 320 a ja TP BF-StB B 7.1 1988/. Näin saaduista arvoista valitaan usein suurempi /Parantainen 1982/. CBR- kokeita voidaan tehdä luonnontilaisille, vesiupotuksessa (4-6 vrk) olleille ja sulaville näytteille. CBR-kokeesta on kehitetty myös kentällä käytettävä laite /SNV 670 316 ja ARM 1991/.

$$CBR = \frac{P}{P_s} * 100\% \quad (3.1)$$

CBR on CBR-luku, %

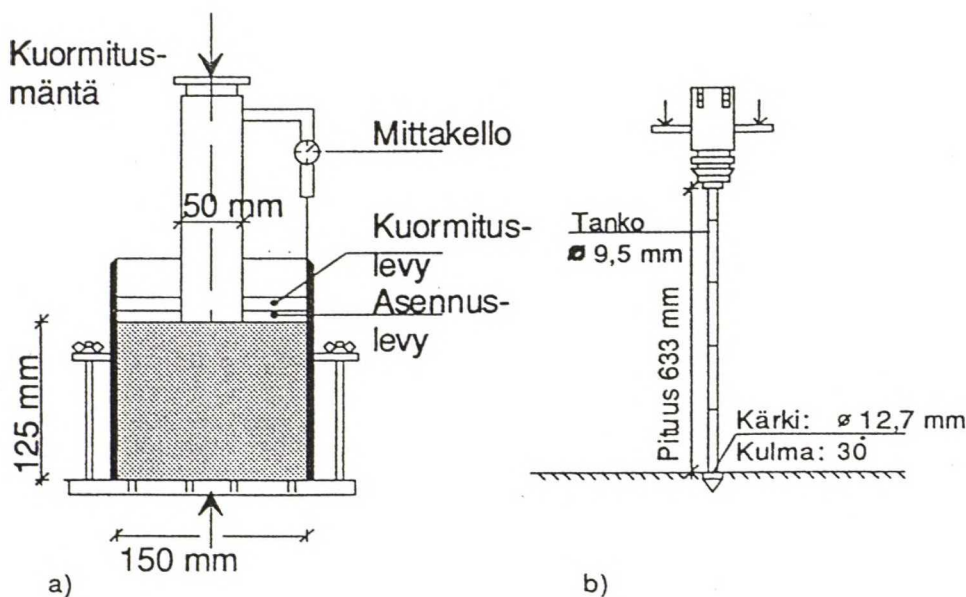
p näytteen kuormitus, Mpa

p_s standardimateriaalin samaa painumaa vastaava kuormitus, Mpa

CBR-luvun ja maapohjan kantavuuden yhteyttä on esitetty usealla eri kaavalla (kaavat 5.1 - 5.4). Kantavuutena saadaan joko staattinen (E₂) tai dynaaminen (M_r) arvo riippuen CBR-kokeen näytteen tilasta.

Jessbergerin /1987/ ja Chamberlainin /1987/ mukaan jäädytys-sulatuskokeen jälkeen määritetyn CBR-luvun perusteella voidaan arvioida myös maalajin routivuutta.

Tutkimusten perusteella routimattoman maalajin CBR-luku on yli 20 %. Jessbergerin mukaan maalaji on erittäin routiva, kun sen CBR-luku on alle 4%.



Kuva 3.3. a) Laboratorio CBR-laitteisto, b) kenttä CBR /Palolahti 1994/.

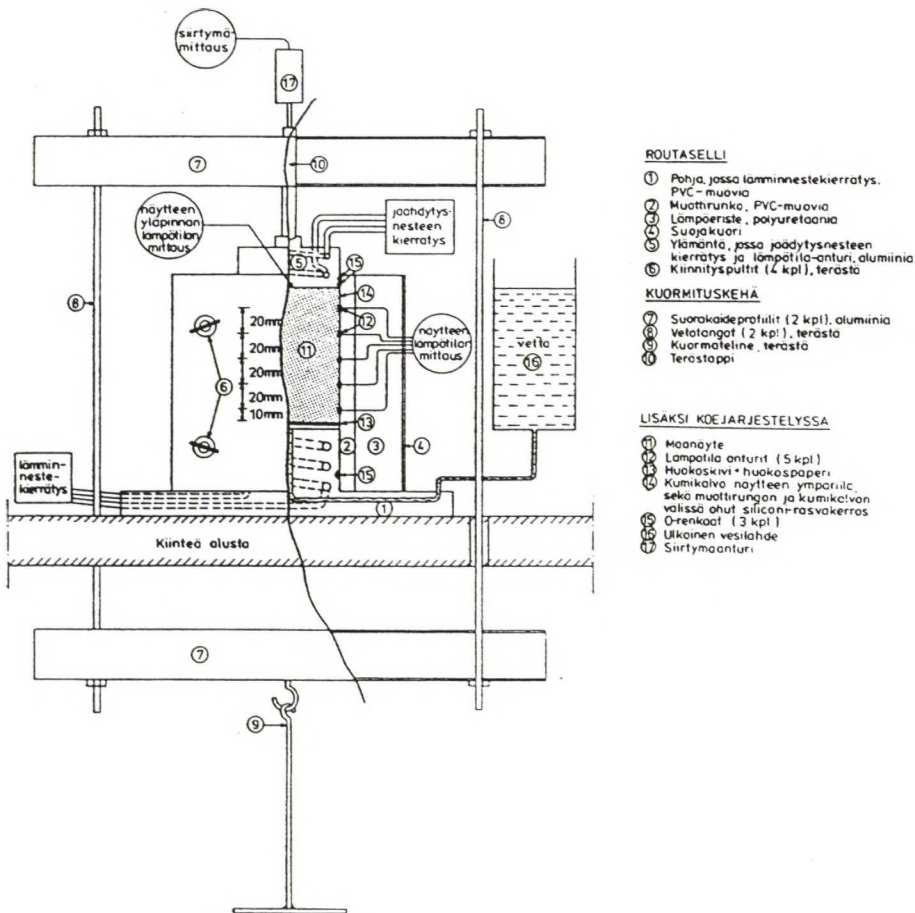
3.2.3 Routanousukoe

Routanousukokeet tehdään yleensä ns. vakiolämpötilakokeina. Koska routanousukoetta ei ole standardisoitu esiintyy koejärjestelyissä eroja. Tämän tutkimuksen routanousukokeet on tehty VTT:n tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratoriossa, jossa koe tehdään seuraavasti.

Aluksi näyte jäädytetään pakkaskaapissa vuorokauden ajan, jonka jälkeen se sulatetaan eristetyssä routasellissä 20 kPa pintakuormituksen alaisena. Näytteen halkaisija on 80 mm ja korkeus 100 mm. Tämän jälkeen näyte kyllästetään vedellä liittämällä näytteen pohja ulkopuoliseen vesilähteeseen huokospaperin ja -kiven välityksellä. Ulkopuolisen vesilähteen yläpintaa pidetään näytteen yläpinnan korkeudella. Varsinainen routanousukoe aloitetaan, kun näyte on tasalämpöinen ja täysin kyllästynyt. Näytteen yläpinta saatetaan vakio $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaan ja alapinta pidetään sulana $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa, lämpötilagradientin ja näytteen vedensaannin ylläpitämiseksi /Saarelainen 1992, Kujala 1991/. Kokeen aikana mitataan routanousu ja routarintaman sijainti näytteen kyljessä olevien viiden lämpötila-anturin avulla. Kokeen kesto on vähintään 24 tuntia ja koe lopetetaan, kun routarintaman eteneminen pysähtyy moneksi tunniksi. Tässä tutkimuksessa tehtiin routanousukokeet ainoastaan 0 kuormituksella, mikä vastaa laitteiston painon vuoksi noin 3 kPa kuormitusta. Segregaatiopotentiaali lasketaan kaavalla 3.2 kokeen loppupuolelta, silloin kun roudan syvyys ei enää kasva.

$$SP(t) = \frac{v(t)}{\nabla T_f(t)} = \frac{1}{1,09} * \frac{\Delta h_s}{\Delta t \nabla T_f(t)} \quad (3.2)$$

SP on segregatiopotentiaali, mm²/Kh
 v(t) näytteeseen ajassa Δt imeytyneen veden keskimääräinen nopeus pintayksikköä kohti, mm/s
 ∇T_f(t) keskimääräinen lämpötilagradientti routimiskerroksessa, K/mm
 t aika, s
 Δh_s routanousu ajassa Δt, mm



Kuva 3.4. Routanousukokeen koejärjestely /Friberg & Slunga 1989/.

3.2.4 Kenttäkokeet ja -havainnot

Kenttähavainnot

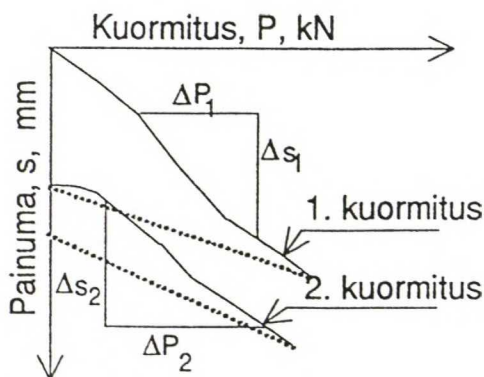
Routan syvyys voidaan mitata Gandahlin routaputkella, joka koostuu kahdesta sisäkkäisestä suljetusta muoviputkesta /Friberg & Slunga 1989/. Routarajan sijainnin mittaaminen perustuu siihen, että sisemmässä putkessa oleva metyleeni-siniliuos menettää sinertävän värinsä alle 0 °C lämpötilassa. Mittauksen ajaksi sisempi putki nostetaan ylös ulommasta putkesta.

Routanousu saadaan vaaitsemalla joko tien pinnan tai routaputken pään korkeusasema tunnetun kiintopisteen avulla. Liitteessä 1 on esitetty esimerkki segregatiopotentiaalin laskemisesta in situ havainnoista.

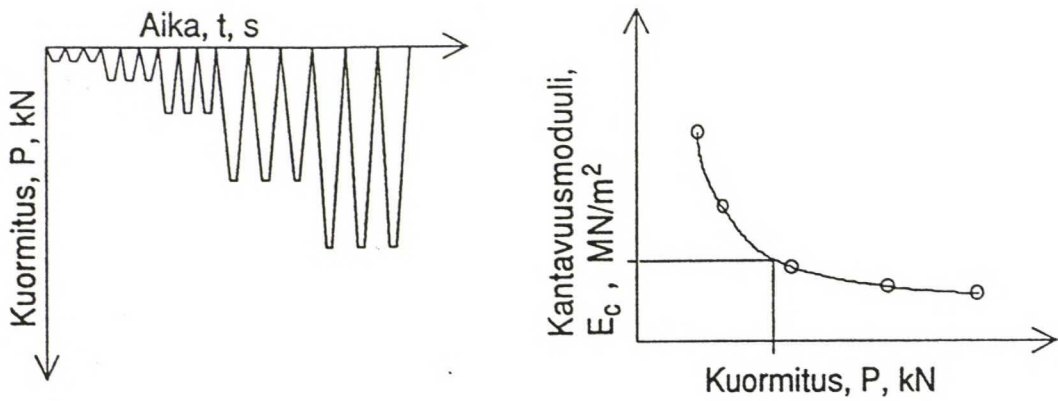
Pohjavedenpinnan syvyys maanpinnasta mitataan maahan lyödyistä, tyhjennetyistä teräsputkesta joko jäykän mitan tai sähköisen mittaluodin avulla.

Levykuormituskokeet

Levykuormituskokeessa pohjamaan pintaa kuormitetaan maahan ennalta-asennettujen kuormituslevyjen päältä. Tavallisessa levykuormituskokeessa /Tiel 1990/ kantavuusmoduuli E_2 saadaan toistokuormitusvaiheesta (kuva 3.5). STINA- levykuormituskokeessa kuormitusta nostetaan viidessä portaassa ja kullakin portaalla tehdään kolme kuormitusta, jonka jälkeen painuman annetaan palautua (kuva 3.6). Levyn kokonaispainuma ja palautuma havaitaan jokaisen kuormituksen yhteydessä. Kantavuusmoduuli E_c lasketaan kullekin kuormitusportaalle kokonaispainuman perusteella. Kuormitusta ei jatketa, jos painuma ylittää 1 mm, maan murtumisen välttämiseksi /Jämsä 1985/.



Kuva 3.5. Tavallisen levykuormituskokeen tulostus.



Kuva 3.6. STINA-levykuormituskokeen periaate ja tulostus.

Pudotuspainokoe

Pudotuspainolaitteella mitataan tien pinnan taipumaa nopean dynaamisen kuormituksen alaisena. Dynaaminen kuormitus saadaan aikaan pudottamalla paino tietyltä korkeudelta kuormituslevyn päälle /Tholen 1980, Liimatta 1989/.

Putoava paino aiheuttaa tien pintaan taipuman, joka mitataan kiihtyvyyssantureilla kuormituslevyn keskeltä ja tiettyjen etäisyyksien päästä levystä. Saadusta taipumasuppi-
lost eli tien pinnan taipumasta arvioidaan pohjamaan kantavuusmoduuli E_{fwd} ns. takaisinlaskentaohjelmalla. Ohjelma etsii taipumasuppilon perusteella rakennekerroksille sopivat E_{fwd} - moduulin arvot.

4. TUTKIMUSAINEISTO

4.1 Aikaisemmat tutkimukset

Vuonna 1974 aloitetussa yhteispohjoismaisessa STINA-projektissa /1977/ tutkittiin tien rakennekerrosten alla olevan pohjamaan kantavuusmoduulin vaihtelua vuodenajan mukaan. Suomessa kohteina olivat Vihdin ja Otaniemen tutkimuskohteet. Kantavuutta mitattiin STINA-levykuormituskokeella, jossa kuormitusta nostetaan viidessä portaassa toistamalla kutakin porrasta kolme kertaa. Kuormituksen jälkeen kuorma poistetaan ja painuman annetaan palautua. Kantavuusmoduuli E_c laskettiin kokonaispainuman perusteella, kullekin kuormitusportaalle.

"Pohjamaan kantavuus tierakenteen alla" -projektissa /Jämsä 1985/ tutkittiin vuosina 1976-1984 eri pohjamaalajien kantavuusmoduulien vuodenaikaisvaihteluja tierakenteen alla. Tielaitoksen rahoittamassa tutkimuksessa on jatkettu STINA-levykuormituskokeiden /STINA 1977/ periaatetta.

Friberg et al. /1989/ tutki "Maalajien routivuuskriteerien kehittäminen" -projektissa uusimpien routivuuskriteerien soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin. Laboratorio- ja kenttätutkimuksia tehtiin viidellä eri paikkakunnalla: Jämsässä, Myrskylässä, Mäntyharjulla, Pippolassa ja Urjalassa. Tutkimus tehtiin yhteistyössä TKK:n pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorion, VTT:n geotekniikan laboratorion sekä tie- ja liikenne laboratorion, Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennusgeologian laboratorion ja Oulun yliopiston geoteknillisen laboratorion kesken.

Kujala /1991/ tutki Oulun yliopistossa tekijöitä, jotka vaikuttavat routimisherkkyyteen ja routanousupaineeseen. Maanäytteet (68 kpl) käsittivät kaikki maalajit savesta hiekkaan sekä eri moreenityypit (liite 11).

Saarelainen /1992/ on tutkinut routanousua ja roudansyvyyttä kenttä- ja laboratorio-olosuhteissa. Kenttätutkimuksia tehtiin kuudessa eri kohteessa, Alajärvellä, Piippolassa ja Joensuussa.

"Sulamispehmeneminen ja kevätkantavuus" -projektissa /Palolahti et al. 1993/ määritettiin pohjamaiden luokitusominaisuudet, lämpötekniset ja hydrauliset ominaisuudet, vedenpidätyskyky sekä huokosjakaumat. Lisäksi tehtiin CBR-kokeita ja jaksollisia kolmiakσιαalikokeita. Tutkimuskohteissa havaittiin myös roudan syvyyttä, routanousua, sulamissyvyyttä ja pohjavedenpinnan korkeutta kahtena havaintokeväänä 1991 ja 1992. Kantavuus- ja huokospainemittauksia tehtiin vertailuarvon saamiseksi viikon välein

sulamisvaiheessa sekä syksyisin. Kantavuusmittauksia tehtiin pudotuspainolaitteella ja levykuormituslaitteella. Tutkimuksia tehtiin viidessä eri kohteessa, Nummi-Pusulassa, Kontulassa, Jyväskylässä, Oulunsuussa ja Kempele- Oulunsalossa.

4.2 Täydentävät tutkimukset

4.2.1 Stina-projektin tutkimuskohteet

STINA-projektin /1977/ tutkimuskohteista valittiin kaksi kohdetta lisätutkimuksia varten.

Kantatie 53:lta haettiin 2.8.1993 näytteitä osuudelta Palojärvi-Olkkala pl 114+80. Näytteenottopaikka sijaitsee kyseisen tien oikealla puolella Vihtiin päin mentäessä. Näytteenottokuoppa kaivettiin ojan luiskaan noin 4 metriä tien reunasta. Kuopan pohjan syvyys oli 0.7 metriä nykyisestä tienpinnasta.

Otaniemessä, VTT:n tie-,geo-, ja liikennetekniikanlaboratorion pysäköintipaikan läheisyydessä sijaitsevan kohteen maanäytteet haettiin 22.9.1993. Näytteenottokuoppa kaivettiin nykyisestä maanpinnasta 0.6 metrin syvyyteen.

Ensinmainitusta kohteesta haettiin luonnontilaisia näytteitä CBR- ja routanousukoetta (liite 2) varten. Otaniemen hiekkamoreenista ei saatu luonnontilaisia näytteitä, joten CBR- ja routanousukokeen koekappaleet jouduttiin rakentamaan häiriintyneestä näytteestä. Lisäksi molemmista kohteista otettiin häiriintynyt näyte luokituskokeita varten.

4.2.2 Pohjamaan kantavuus -projektin tutkimuskohteet

Pohjamaan kantavuus -projektin /Jämsä 1985/ tutkimuskohteista valittiin myöskin kaksi kohdetta, joista haettiin materiaalia lisätutkimuksia varten.

Ensimmäinen kohde sijaitsi Palojärvi-Olkkala tiellä, paalulla 100+17. Näytekuoppa kaivettiin 2.8.1993 tien oikealle puolelle, tien reunasta noin 3 metrin päähän. Kuopan pohja ulotettiin 0.9 metrin syvyyteen nykyisestä tienpinnasta.

Toisen kohteen paaluluku oli 100+40 samalla tiellä. Näytteet otettiin 17.8.1993 noin 3 metrin etäisyydeltä tien oikeasta reunasta. Näytteenottosyvyys oli 0.8 metriä nykyisestä tienpinnasta.

Molemmista kohteista otettiin luonnontilaiset näytteet CBR-kokeita ja routanousukokeita varten sekä häiriintyneet näytteet luokituskokeita varten.

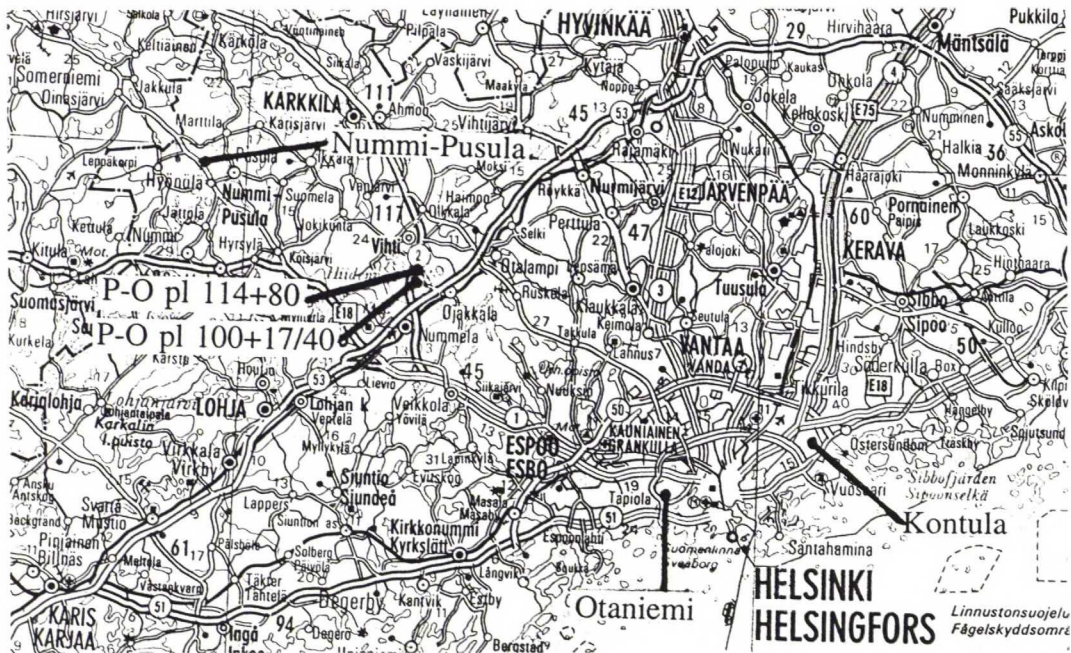
4.2.3 Kevätkantavuusprojektin kohteet

Kevätkantavuusprojektin /Palolahti et al. 1993/ kohteista Kontula ja Nummi-Pusula valittiin lisätutkimuskohteiksi. Kontulasta haettiin näytteitä 4.6.1993. Kohde sijaitsee Untamalandien päässä sijaitsevalla koepenkereellä. Näytteenottosyvyys oli 0.75 metriä nykyisestä maanpinnasta.

Nummi-Pusulasta haettiin näytteet 28.6.1993. Näytteenottopaikka sijaitsee maantie 280:llä, Hyönölän taajamasta noin 2 kilometriä Somerolle päin. Näytteet otettiin kuopasta, joka oli tien oikealla puolella Somerolle mentäessä noin 2 metriä tien reunasta ja syvyydeltään 1.0-1.2 metriä.

Näytteitä otettiin luonnontilaisena CBR-koetta varten ja häiriintyneenä luokitusominaisuuksien määrittämistä varten.

Tutkimuskohteiden sijainti on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Täydentävien tutkimusten kohteiden sijainti.

5. KEVÄTKANTAVUUDEN MÄÄRITYS

5.1 Aikaisemmat tutkimukset

Taulukossa 5.1 ovat Ilmatieteen laitoksen kuukausikatsauksista ja pikatilastoista saadut ilman keskilämpötilat eri kohteissa. Taulukossa 5.2 ovat samoista ilmastotiedoista vuorokausikeskilämpötilojen perusteella lasketut vuosien 1990-91 ja 1991-92 talvien pakkasmäärät ja Mäkelän et al. /1979/ esittämät, tilastollisesti kerran kahdessa ja kerran kymmenessä vuodessa toistuvat pakkasmäärät. Taulukossa 5.3 on esitetty tutkimuksen Palolahti et al. /1993/ aikana tehty CBR-kokeen tulokset vesiupotuksessa säilytetylle ja sulavalle näytteelle. Eri yhteyksissä määritetyt segregatiopotentiaalien arvot ovat taulukoissa 6.5 ja 6.6, mitatut roudan syvyydet taulukoissa 6.3 ja 6.4 ja routanousut taulukossa 6.9. Sulamispehmeneminen ja kevätkantavuus projektin /Palolahti et al. 1993/ yhteydessä tehtyjen levykuormituskokeiden tulokset ovat taulukossa 5.6.

STINA /1977/ tutkimuksen yhteydessä saadut CBR-kokeen tulokset on esitetty taulukossa 5.3. STINA-projektin /1977/ ja Jämsän /1985/ tutkimusten levykuormituskokeiden tuloksia on taulukossa 5.6.

Taulukko 5.1. Säähavaintoasemat ja ilman vuotuiset keskilämpötilat.

Tutkimus- paikkakunta	Säähavainto- asema	Ilman keskilämpötila, °C			
		1990	1991	1931-60	1961-90
Kontula	Helsinki, Vantaa	6.1	5.6	4.4	4.5
Nummi-Pusula	Vihti, Maasoja	5.7	5.0	4.1	3.9
Jyväskylä	Jyväskylä, lentoasema	3.9	3.6	2.8	2.6
Oulu	Oulu, lentoasema	3.5	3.0	2.3	2.0

Taulukko 5.2. Tutkimuskohteiden pakkasmäärät talvikausina 1990-91 ja 1991- 92 sekä eri todennäköisyydellä toistuvat pakkasmäärät F_2 ja F_{10} /Palolahti et al. 1993/.

Tutkimus- paikkakunta	Pakkasmäärä F, Kh		Vuoden pakkasmäärä /Mäkelä et al. 1979/ F_2 F_{10}	
	1990-91	1991-92		
Kontula	10 320	5 030	11 300	23000
Nummi-Pusula	11 897	5 880	11 300	23 000
Jyväskylä	19 728	11 172	19 800	33 000
Oulu	24 960	13 188	24 600	38 600

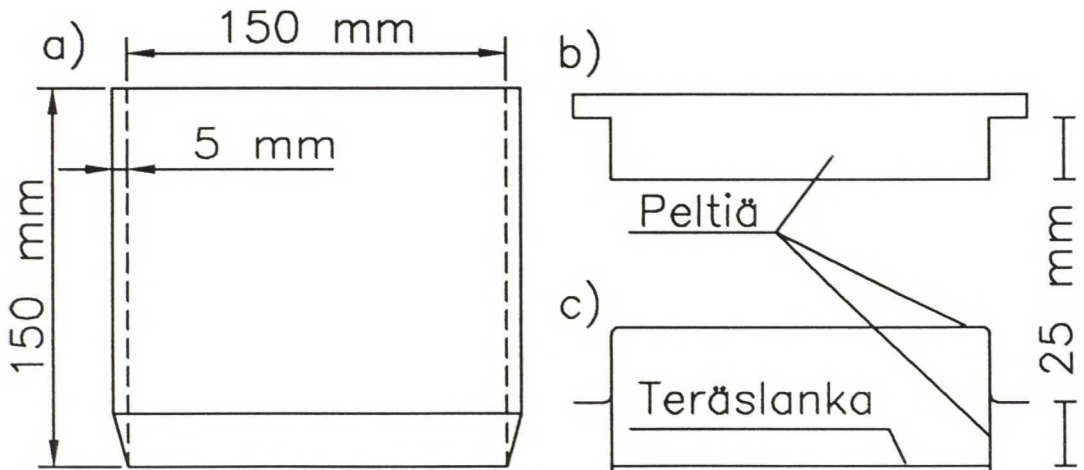
Taulukko 5.3. CBR-kokeen tulokset /Palolahti et al. 1993 ja STINA 1977/.

Tutkimuskohde	Maalaji	CBR, vesi-upotus %	CBR, sulava %	CBR, luonnon- tilainen %
Nummi-Pusula	saSi	4.0	2.0	
Kontula	liSa	1.2	0.4	
Jyväskylä	saSi	2.9	2.7	
Oulunsuu	hkSi	0.13	0.13	
Kempele- Oulunsalo	laSa	8.5	0.32	
Vihti	laSa			3.3 ja 5.4
Otaniemi	HkMr			16

5.2 Täydentävät tutkimukset

5.2.1 Häiriintymättömien näytteiden otto

CBR-koetta varten näytteet pyrittiin saamaan mahdollisimman häiriintymättöminä. Näytteen korkeuden tuli olla 125 mm ja halkaisijan 150 mm. Koska saatavilla ei ollut tämän kokoista näytteenotinta, kokeiltiin tarkoitukseen sopivaa, eri materiaaleista valmistettua, putkea. Kontulan kohteessa näytteenottimina käytettiin alumiinisesta ilmastointiputkesta ja muoviputkesta tehtyjä näytteenottimia. Koska kohteen maalaji oli pehmeää savea, koekappaleiden otto onnistui kohtalaisesti käsin putkea maahan painamalla. Heikkoutena alumiiniputkessa oli kuitenkin se, että putken reuna ei kestänyt kovinkaan suurta räsitusta putkea maahan työnnettäessä, vaan se taittui. Muoviputki kesti hyvin maahantyön, mutta joissain putkissa havaittiin poikkileikkauksen muuttuneen myöhemmin lievästi soikeaksi. Kaikissa muissa kohteissa käytettiin teräspuutkesta tehtyä näytteenotinta (kuva 5.1,a). Sen seinämärakenne oli tarpeeksi paksu, joten niiden ei havaittu muuttavan muotoaan mitenkään. Maahantyön helpottamiseksi putkien kärjet olivat työstetty teräviksi ja putket oli upotettu sulaan parafiiniin ennen käyttöä. Vaikeinta näytteenotto oli Palojärvi-Olkala tiellä, paaluluvulla 100+17, jossa maapohja oli kuiva-kuorisavea. Kohteessa putket jouduttiin upottamaan maahan kaivinkoneen kauhalla puristaen, jolloin putki ei aina uponnut suorana maahan. Muissa kohteissa putki lyötiin maahan nuijalla, pitäen puukappaletta teräspuutken päällä. Jotta näytteet olisi saatu mahdollisimman häiriintymättöminä vaaditun 125 mm korkuisina ja jotta niiden koestuspinta olisi ollut mahdollisimman tasainen, näytettä otettiin aluksi koko teräspuutken pituudelta (150 mm). Laboratoriossa näytteet lyhennettiin oikeaan mittaan tähän tarkoitukseen erikseen tehdyillä työkaluilla. Näyte halkaistiin yläosastaan 25 mm syvyydelle (kuva 5.1,b), jonka jälkeen ylimääräinen maa-aines leikattiin teräslangalla pois (kuva 5.1,c).



Kuva 5.1. Piirros a) teräsisestä näytteenottimesta ja b,c) näytteen lyhentämistä varten tehdyistä työkaluista.

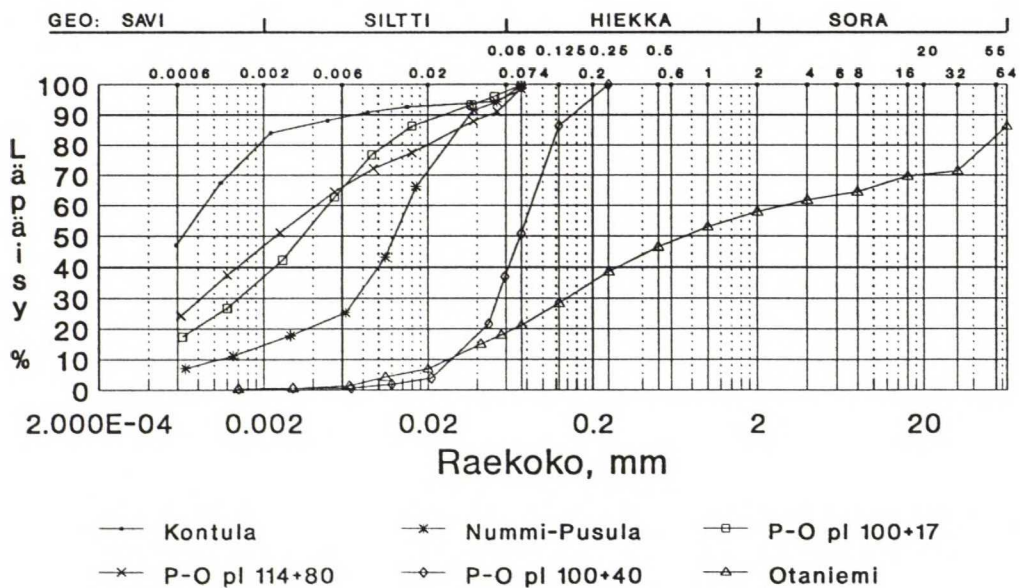
5.2.2 Kontula

Tutkittu materiaali oli lihavaa savea (kuva 5.2), jonka savipitoisuus oli 81.5 % ja hienoainespitoisuus (≤ 0.074 mm) 98.2 %. Kiintotiheys oli 2.78 t/m³ ja kuivairtitiheys 0.76 t/m³ luonnontilaisen vesipitoisuuden ollessa 99.4 %. Saven humuspitoisuus oli 0.55 %. Huokoisuus oli 73 % sekä kyllästysaste 100 % (liite 3).

Saven juoksuraja oli 82.8 %. Savi oli erittäin plastista plastisuusluvun ollessa 52.3 %. Kartiokokeella saatiin häiritylle näytteelle hienousluku 84.2 %.

Tehtyjen CBR- kokeiden tulokset (liite 4) ja vesipitoisuudet kokeen lopussa on esitetty taulukossa 5.4. Sama yhteys on esitetty kuvaajana liitteessä 5.

Liitteessä 6 on vertailtu tässä tutkimuksessa saatua CBR-luvun ja vesipitoisuuden välistä vuorosuhdetta Arm'in /1991/ laboratoriossa ja kentällä saamiin tuloksiin (vrt. liite 7).



Kuva 5.2. Tutkimuskohteiden rakeisuuskäyrät (P-O = Palojärvi-Olkkala).

Taulukko 5.4. CBR- kokeiden tulokset ja vesipitoisuudet
(P-O = Palojärvi-Olkkala tie).

a) Luonnontilaiset näytteet.

Kontula liSa		Nummi- Pusula saSi		P-O pl 100+17 laSa		P-O pl 114+80 laSa		P-O pl 10- 0+40 siHk		Otaniemi HkMr	
CBR %	w %	CBR %	w %	CBR %	w %	CBR %	w %	CBR %	w %	CBR %	w %
1.1	89	3.3	29	23	20	3.4	36	32	23	10	10
1.0	98	3.2	29			4.1	33	23	23	8.8	10
1.0	94					4.2	30	23	22		
1.1	98										
0.8	77										

b) Vesiupotuksessa olleet näytteet

0.7	10 1	1.9	30	2.3	30	4.3	35	19	23	5.2	15
0.8	98	2.3	30	3.8	27	3.9	34	23	24	5.1	16
		2.8	29	2.7	26	4.5	31	18	24		

5.2.3 Nummi-Pusula

Maa-aines oli savista silttiä, jonka savipitoisuus oli 15% ja hienoainespitoisuus 99.6 %. Siltin kiintotiheys oli 2.68 t/m³, kuivairtoteheys 1.48 t/m³ ja luonnontilainen vesipitoisuus syvyydellä 1.0 metriä 28.0 % ja syvyydellä 1.2 metriä 31.1 %. Humuspitoisuus oli 0.83 %, huokoisuus 45.0 % ja kyllästysaste 92 %.

Syvyydellä 1.0 metriä siltti oli vähän plastista plastisuusluvun ollessa 4.5 % ja juoksurajan 29.5 %. Syvyydellä 1.2 metriä plastisuusluku oli 11.4 %. Kohtalaisesti

plastisen siltin juoksuraja oli 33.4 %. Kartiokokeen hienousluvuksi häirityllä näytteellä saatiin syvyydellä 1.0 metriä 31.1 % ja syvyydellä 1.2 metriä 37.3 %.

5.2.4 Palojärvi-Olkkala tie pl 100+17

Tutkittu materiaali oli laihaa kuivakuorisavea, jonka savipitoisuus oli 37 % ja hienoainespitoisuus 99.8 %. Kiintotiheys oli 2.73 t/m³ ja kuivairtitiheys 1.7 t/m³ luonnontilaisen vesipitoisuuden ollessa 23.8 %. Savessa ei ollut humusta. Huokoisuus oli 37.9 % sekä kyllästysaste 100 %.

Saven juoksuraja oli 36.9 %. Savi oli kohtalaisen plastista plastisuusluvun ollessa 13.6 %. Kartiokokeella saatiin häiritylle näytteelle hienousluku 39.5 %.

5.2.5 Palojärvi-Olkkala tie pl 114+80

Maa-aines oli laihaa savea, jonka savipitoisuus oli 47 % ja hienoainespitoisuus 98.6 %. Saven kiintotiheys oli 2.73 t/m³, kuivairtitiheys 1.42 t/m³ ja luonnontilainen vesipitoisuus 33.2 %. Humuspitoisuus oli 1.34 %, huokoisuus 48.0 % ja kyllästysaste 98 %.

Savi oli erittäin plastista plastisuusluvun ollessa 30.9 %. Juoksuraja oli 58.5 %. Kartiokokeen hienousluvuksi häirityllä näytteellä saatiin 61.5 %.

5.2.6 Palojärvi-Olkkala tie pl 100+40

Tutkimuspisteen materiaali oli hiekkaa (kuva 5.2), jonka savipitoisuus oli 0.6 % ja hienoainespitoisuus 50.9 %. Humusta hiekassa oli 0.5 %. Hiekan kuivairtitiheys oli 1.68 t/m³ luonnontilaisen vesipitoisuuden ollessa 21.5 %. Kiintotiheys oli 2.68 t/m³, huokoisuus 37.4 % ja kyllästysaste 97 %. Koska materiaali oli hiekkaa, ei siitä voitu määrittää plastisia ominaisuuksia. Kartiokokeella saatiin hiekalle hienousluvuksi 27.4 %.

5.2.7 Otaniemi

Otaniemestä haettu maanäyte oli hiekkamoreenia, jossa oli savea vain 0.4 % sekä

hienoaainesta 7 %. Moreenissa oli humusta 0.5 % ja sen kuivairtitiheys oli 1.52 t/m³. Luonnontilainen vesipitoisuus oli 8.9 % ja kiintotiheys 2.68 t/m³. Moreenin huokoisuudeksi saatiin 43.1 % kyllästysasteen ollessa 31 %.

Koska materiaali oli hiekkamoreenia, ei siitä voitu määrittää plastisia ominaisuuksia.

5.3 Pohjamaan kantavuusmoduulin määrittäminen eri menetelmillä

5.3.1 Kokemusperäinen kantavuusmoduulin arviointi

Tielaitoksen /TVH 1985/ käytännön mukaan alusrakenteen kantavuus saadaan maalajin rakeisuuskäyrän, routivuuden ja kosteusolosuhteiden mukaan. Luokituksessa pohjamaan kantavuus jaetaan seitsemään kantavuusluokkaan A - G , joissa kantavuusmoduuli on vaihdellen 5 ...300 MN/m². Pohjamaiden kantavuudet tämän käytännön perusteella arvioituna on esitetty taulukossa 5.5.

Taulukko 5.5. Pohjamaan kantavuus tutkimuskohteissa tielaitoksen /TVH 1985/ mukaan.

Tutkimuskohde	Maalaji	Kantavuus E ₂ , MN/m ²
Kontula	liSa	5
Nummi-Pusula	saSi	10
P-O pl 100+17	laSa, kk	20
P-O pl 114+80	laSa	5
P-O pl 100+40	siHk	20
Otaniemi	HkMr	20
Jyväskylä	saSi	20
Oulunsuu	hkSi	20
Kempele-Oulunsalo	laSa	20

5.3.2 CBR-kokeen perusteella arvioitu kantavuusmoduuli

STINA-tutkimuksessa /1977/ havaittiin kaavan 5.1 mukainen vuorosuhde luonnontilaisilla sulilla näytteillä määritetyn CBR-luvun ja jaksollisen kolmiaksiaalikokeen tulosten välillä. Vuorosuhde on esitetty myös kaavan 5.2 muodossa /Shell 1978/.

$$M_r = 10 * CBR \quad (5.1)$$

$$M_r = 17.6 * CBR^{0.64} \quad (5.2)$$

Orama /1993/ on saanut sulamisvaiheessa määritetyn CBR-luvun ja levykuormituskokeella saadun kantavuusmoduulin välille kaavan 5.3 mukaisen vuorosuhteen Jessbergerin /1974/ tulosten perusteella. Vuorosuhde voidaan esittää myös kaavan 5.4 mukaisesti /Orama 1993/.

$$E_2 = 5.84 * CBR^{0.80} \quad (5.3)$$

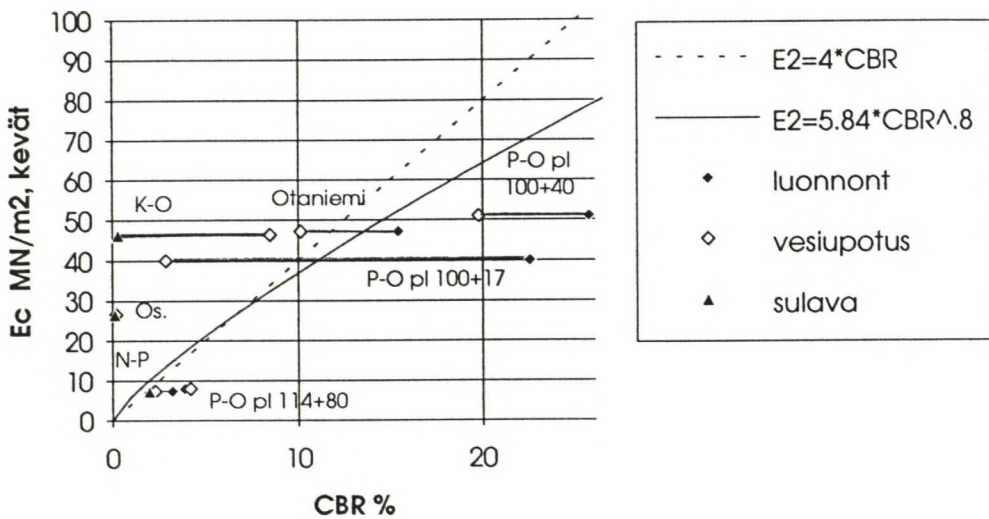
$$E_2 = 4 * CBR \quad (5.4)$$

M_r on dynaaminen kimmomoduuli, MN/m^2

CBR CBR-kokeen kantavuusarvo, %

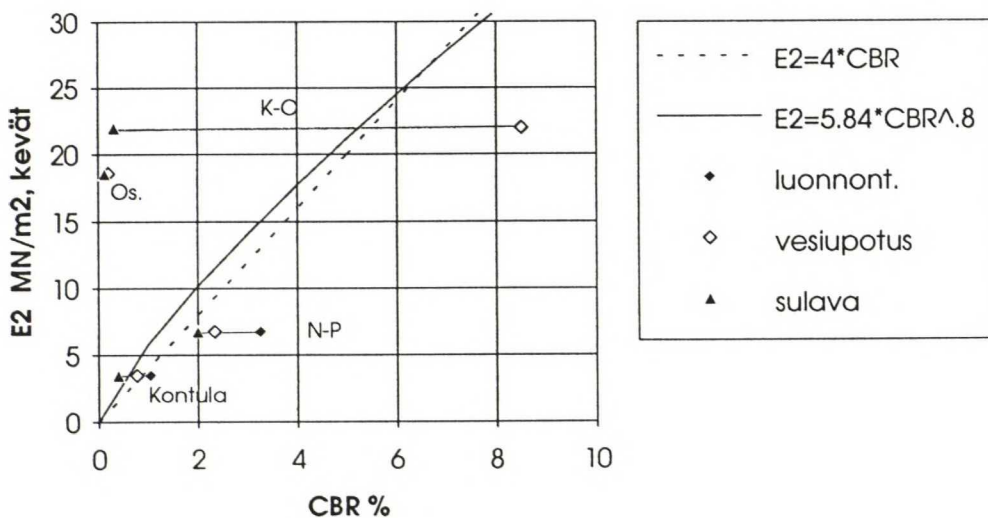
E_2 staattinen kantavuusmoduuli toistokuormituksesta, MN/m^2

Kuvassa 5.3 on esitetty sulan, vesiupotuksessa säilytetyn ja sulavan maan CBR-kokeiden sekä keväällä tehtyjen STINA-levykuormituskokeiden tulosten välinen vuorosuhde. Kuvaan on lisäksi piirretty kaavojen 5.3 ja 5.4 antama vuorosuhde sulavan maan CBR-kokeen ja levykuormituskokeen tulosten välillä. Vaikka hajonta on suurta, näyttäisi luonnontilaisen ja vesiupotuksessa olleen näytteen CBR-kokeen tuloksen keskiarvo asettuvan likimääräisesti kaavoja 5.3 ja 5.4 kuvaavan käyrän kohdalle. Oulunsuun ja Kempele-Oulunsalon kohteiden etenkin sulavan maan CBR-kokeen tulokset eroavat muista tuloksista huomattavasti.



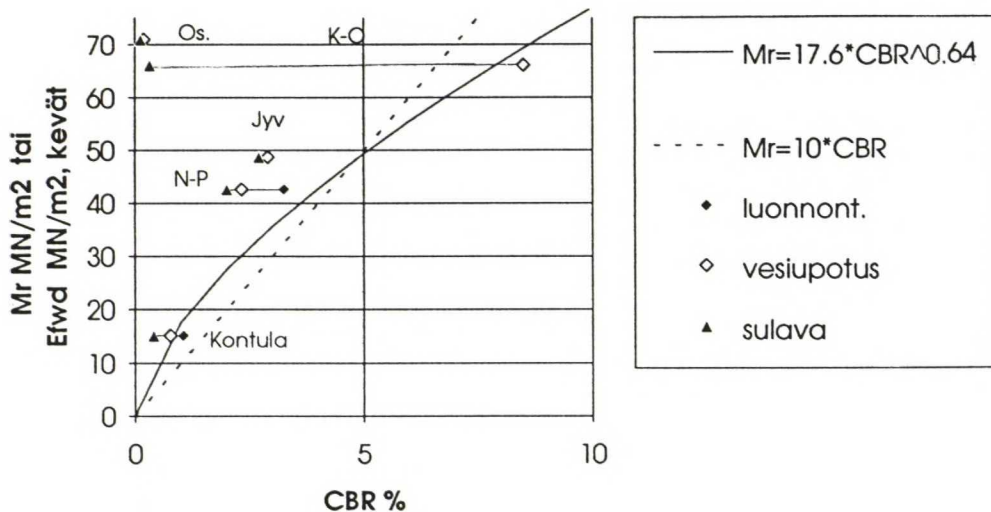
Kuva 5.3. Keväällä tehtyjen Stina-levykuormituskokeiden ja CBR-kokeiden tulosten vuorosuhde sekä kaavojen 5.3 ja 5.4 kuvaama vuorosuhde.

Kuvassa 5.4 on esitetty CBR-kokeiden ja keväällä tehtyjen levykuormituskokeiden tulosten välinen vuorosuhde. Kuvaan on lisäksi piirretty kaavojen 5.3 ja 5.4 antama vuorosuhde sulavan maan CBR-kokeen ja levykuormituskokeen tulosten välillä. Kuvan tuloksissa on samanlainen suuntaus kuin kuvan 5.3 tuloksissa.



Kuva 5.4. Keväällä tehtyjen levykuormituskokeiden ja CBR-kokeiden tulosten vuorosuhde sekä kaavojen 5.3 ja 5.4 kuvaama vuorosuhde.

Kuvassa 5.5 on esitetty CBR-kokeiden tulosten ja keväällä tehtyjen pudotuspainolaitteen tulosten välinen vuorosuhde. Kuvaan on lisäksi piirretty kaavojen 5.1 ja 5.2 antama vuorosuhde sulan maan CBR-kokeen ja jaksollisen kolmiakσιαalikokeen tulosten välillä. Pudotuspainolaitteen tuloksia verrataan dynaamiseen kimmomoduuliin, koska pudotuspainolaite on luonteeltaan dynaaminen koestuslaite. CBR- kokeen tulosten perusteella arvioidut moduuliarvot asettuvat hieman kaavojen 5.1 ja 5.2 kuvaajien yläpuolelle. Koetulosten ja kaavojen välinen yhteys on selvempi kuin kuvissa 5.3 ja 5.4.



Kuva 5.5. Keväällä tehtyjen pudotuspainokokeiden ja CBR-kokeiden tulosten vuorosuhde sekä kaavojen 5.1 ja 5.2 kuvaama vuorosuhde.

5.3.3 Moduulin määrittäminen levykuormituskokeilla

Tässä tutkimuksessa käsitellyistä yhdeksästä kohteesta kaksi kuuluu vuoden 1977 STINA- kohteisiin. Kaksi kohdetta kuuluu vuoden 1985 Jämsän tutkimuskohteisiin ja loput viisi vuonna 1990 tehtyihin tutkimuksiin. Levykuormituskokeita on tehty sekä tielaitoksen käyttämällä menetelmällä (kuva 3.5) että STINA-menetelmällä (kuva 3.6). Lisäksi joissain kohteissa on tehty mittauksia pudotuspainolaitteella. Mittausten tulokset on esitetty taulukossa 5.6. STINA-kokeiden tulokset on luettu kuormitus-kantavuusmoduuli-kuvaajalta 40 kPa:n kohdalta. Pudotuspainolaitteella saadut tulokset on arvioitu tien pinnalta tehtyjen kokeiden tulosten perusteella ns. takaisinlaskentaohjelmia käyttäen. Kevään arvona on käytetty kevään alhaisinta ja sulan kauden (kesä)arvona loppukesän/alkusyksyn korkeinta kantavuuden arvoa. Kantavuusmittaukset on tehty tutkimusten STINA /1977/, Jämsä /1985/ ja Palolahti et al. /1993/ yhteydessä.

Taulukko 5.6. STINA-levykuormituskokeella (E_c) /STINA 1977, Jämsä 1985/, levykuormituskokeella (E_2) ja pudotuspainolaitteella (E_{fwd}) /Palolahti et al. 1993/ määritetyt pohjamaan kantavuusmoduulit.

Tutkimuskohde	E_c MN/m ²		E_2 MN/m ²		E_{fwd} MN/m ²	
	Kevät	Kesä	Kevät	Kesä	Kevät	Kesä
Kontula	-	-	3.5	6.5	15.1	16.9
Nummi-Pusula	7.3	15.9	6.8	21.7	42.7	58.2
P-O pl 100+17	40	55	-	-	-	-
P-O pl 114+80	8	17	-	-	-	-
P-O pl 100+40	51	75	-	-	-	-
Otaniemi	47.1	82.7	-	-	-	-
Jyväskylä	-	-	-	-	48.8	70
Oulunsuu	26.6	72	18.6	33.8	71	125
Kempele-Oulunsalo	46.4	54	22.0	25.1	66.1	121

5.4 Kevätkantavuuskerroin

5.4.1 Levykuormituskokeiden tulosten perusteella lasketut kevätkantavuuskertoimet

Mitattujen kantavuusmoduulien avulla voidaan laskea kevätkantavuuskerroin kaavalla 5.5. Tulokset on esitetty taulukossa 5.7.

$$kkk = \frac{E_{kevät}}{E_{kesä}} \quad (5.5)$$

kkk on kevätkantavuuskerroin

$E_{kevät}$ keväällä määritetty kantavuus, MN/m²

$E_{kesä}$ kesällä määritetty kantavuus, MN/m²

Taulukko 5.7. Kevätkantavuuskertoimet levykuormituskokeella ja pudotuspainolaitteella määritettynä.

Tutkimuskohde	kkk $E_{C,kevät}/E_{C,kesä}$	kkk $E_{2,kevät}/E_{2,kesä}$	kkk, $E_{fwd,kevät}/E_{fwd,kesä}$
Kontula	-	0.54	0.89
Nummi-Pusula	0.46	0.31	0.73
Vt 2 pl 100+17	0.73	-	-
Vt 2 pl 114+80	0.47	-	-
Vt 2 pl 100+40	0.68	-	-
Otaniemi	0.57	-	-
Jyväskylä	-	-	0.70
Oulunsuu	0.37	0.55	0.57
Kempele- Oulunsalo	0.86	0.88	0.55

5.4.2 Teoreettinen kevätkantavuuskertoimen arviointi

Kevätkantavuusprojektissa Palolahti et al. /1993/ tarkasteli sulamisvaiheen lyhyen ajan jännitystilän ja maalajin routivuusominaisuuksien vaikutusta kantavuusmoduuliin päätyen kaavaan 5.6. Yksinkertaistetuissa kaavoissa 5.7 ja 5.8 on otaksuttu, että pohjamaan pinnalla vallitseva kokonaiskuormitus σ_0 vastaa pohjamaan konsolidaatiojännitystä σ_c ja että huokospainetta kehittyä pelkästään ajoneuvojen aiheuttamasta lisäjännityksestä $\Delta\sigma$. Maapohjan oletetaan olevan keväällä täysin vedellä kyllästetty eli huokospaineparametri $\bar{B} = 1$ ja kesällä maapohjan oletetaan olevan kuiva ja huokospaineparametri $\bar{B} = 0$. Otaksuen, että kantavuusmoduuli voidaan arvioida kaavojen 5.6-5.9 mukaan, kevätkantavuuskerroin voidaan laskea likimäärin kaavan 5.10 avulla.

$$E = m * \sigma_v * (\frac{\sigma_c - \bar{B} \Delta \sigma - u_0}{\sigma_v})^n$$

(5.6)

$$E_{kevät} = m \cdot \sigma_v \cdot \left(\frac{\sigma_0 - \bar{B} \Delta \sigma}{\sigma_v} \right)^n \quad ; \bar{B}=1 \quad (5.7)$$

$$E_{kesä} = m \cdot \sigma_v \cdot \left(\frac{\sigma_0 - \bar{B} \Delta \sigma}{\sigma_v} \right)^n \quad ; \bar{B}=0 \quad (5.8)$$

$$\sigma_0 = \gamma z + \Delta \sigma \quad (5.9)$$

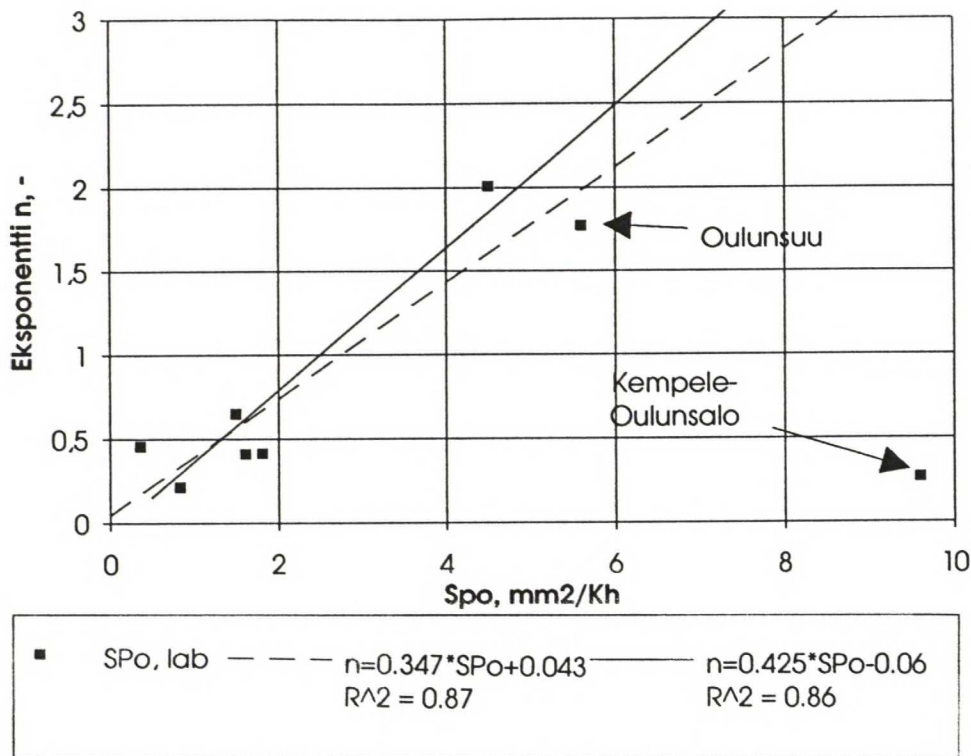
$$kkk = \left(\frac{\gamma z}{\gamma z + \Delta \sigma} \right)^n \quad (5.10)$$

$$n = \frac{\ln(kkk)}{\ln\left(\frac{\gamma z}{\gamma z + \Delta \sigma}\right)} \quad (5.11)$$

E	on	kantavuusmoduuli, MN/m ²
m,n		maalajista ja maan routivuudesta riippuvia kertoimia
σ_c		pohjamaan konsolidaatiojännitys, kPa
σ_0		pohjamaan pinnalla vallitseva pystysuora kokonaisjännitys, kPa
σ_v		vertailujännitys, 1 kPa
\bar{B}		huokospaineparametri, -
u_0		alkutilan huokospaine, kPa
kkk		kevätkantavuuskerroin
γz		maapilarin paino syvyydellä z, kPa
$\Delta \sigma$		liikenteen aiheuttama lisäjännitys pohjamaan pinnalla, kPa

Kokonaisjännityksen arvona ($\gamma z + \Delta \sigma$) on käytetty vakioarvoa 40 kPa.

Kaavoissa esiintyvän eksponentin n on havaittu riippuvan maan routivuudesta ja näin ollen mm. segregatiopotentiaalista kuvan 5.6 mukaisesti /Palolahti et al. 1993/. Kuvaan on lisätty tässä tutkimuksessa saadut tulokset. Oulunsuun ja Kempele-Oulunsalon tulokset eroavat muista tuloksista huomattavasti. Yhtenäinen viiva kuvaa yhteyttä, jossa molemmat Oulun kohteet on huomioimatta ja katkoviiva yhteyttä, jossa vain Kempele-Oulunsalon tulos on huomioimatta. Tulosten erot saattavat johtua erilaisesta käytännöstä routanousukokeissa.



Kuva 5.7 Laboratoriossa määritetyn segregatiopotentiaalin ja havainnoista kaavalla 5.11 lasketun n -kertoimen välinen vuorosuhde. Kokonaisjännityksenä on käytetty laskettuja arvoja ($\gamma_z + \Delta\sigma$). Kuvassa on Palolahti et al:n /1993/ ja tämän tutkimuksen yhteydessä saadut tulokset.

Maalajin routivuuteen vaikuttavat mm. maalajin hienoaineksen määrä, hienoaineksen savipitoisuus ja juoksuraja. Rieke et al. /1983/ on yhdistänyt nämä tekijät kaavan 5.12 hienoustekijällä. Hienoustekijä voidaan laskea myös kaavalla 5.13 /Knutsson et al. 1985/. Kaavaa 5.13 käytettäessä voidaan käyttää myös raekokoa 0.5 mm vastaavan seulan läpäisyprosenttia 0.4 mm:n raekokoa vastaavan läpäisyprosentin sijasta ja vastaavasta aineksesta määritettyä juoksurajaa /Friberg et al. 1989/. Juoksurajaa vastaa likimääräisesti kartiokokeella määritetty hienousluku. Tässä tutkimuksessa tehtyjen laboratoriokokeiden perusteella kartiokokeen hienousluvut olivat keskimäärin 3.5 %-yksikköä suurempia kuin Casagranden koputuskokeella määritetyt juoksurajat.

$$R_f = \frac{(\% \leq 0.002 \text{ mm})}{w_L(0.074 \text{ mm})} * 100\% \quad (5.12)$$

$$R_f = \frac{(\% \leq 0.002 \text{ mm}) (\% \leq 0.074 \text{ mm})}{(\% \leq 0.4 \text{ mm}) w_L(0.4 \text{ mm})} * 100\% \quad (5.13)$$

R_f	on	hienoustekijä (Fines factor), %
$\% \leq 0.002 \text{ mm}$		savipitoisuus, %
$\% \leq 0.074 \text{ mm}$		hienoainespitoisuus, %
$\% \leq 0.4 \text{ mm}$		0.4 mm:ä pienemmän aineksen määrä, %
$w_L(0.074 \text{ mm})$		0.074 mm seulan läpäisseelle ainekselle määritetty juoksuraja, %
$w_L(0.4 \text{ mm})$		0.4 mm seulan läpäisseelle ainekselle määritetty juoksuraja, %

Segregaatiopotentiaalin ja hienoustekijän R_f välillä on havaittu vallitsevan kuvan 5.8 mukainen vuorosuhde /Jessberger et al. 1989/. Kuvaan on lisätty tässä tutkimuksessa saadut pisteet sekä Saarelaisen ja Toivosen /1991/ havainnot valtatie 3:lta. Kuvaan on piirretty kaavan 5.14 mukainen käyrä kuvaamaan ko. vuorosuhdetta. Kaavaa käytettäessä tulee kaikkia desimaaleja käyttää riittävän tarkkuuden säilyttämiseksi (Huom. R_f :n 4. potenssi).

$$SP_0 = A + B * R_f + C * R_f^2 + D * R_f^3 + E * R_f^4 \quad (5.14)$$

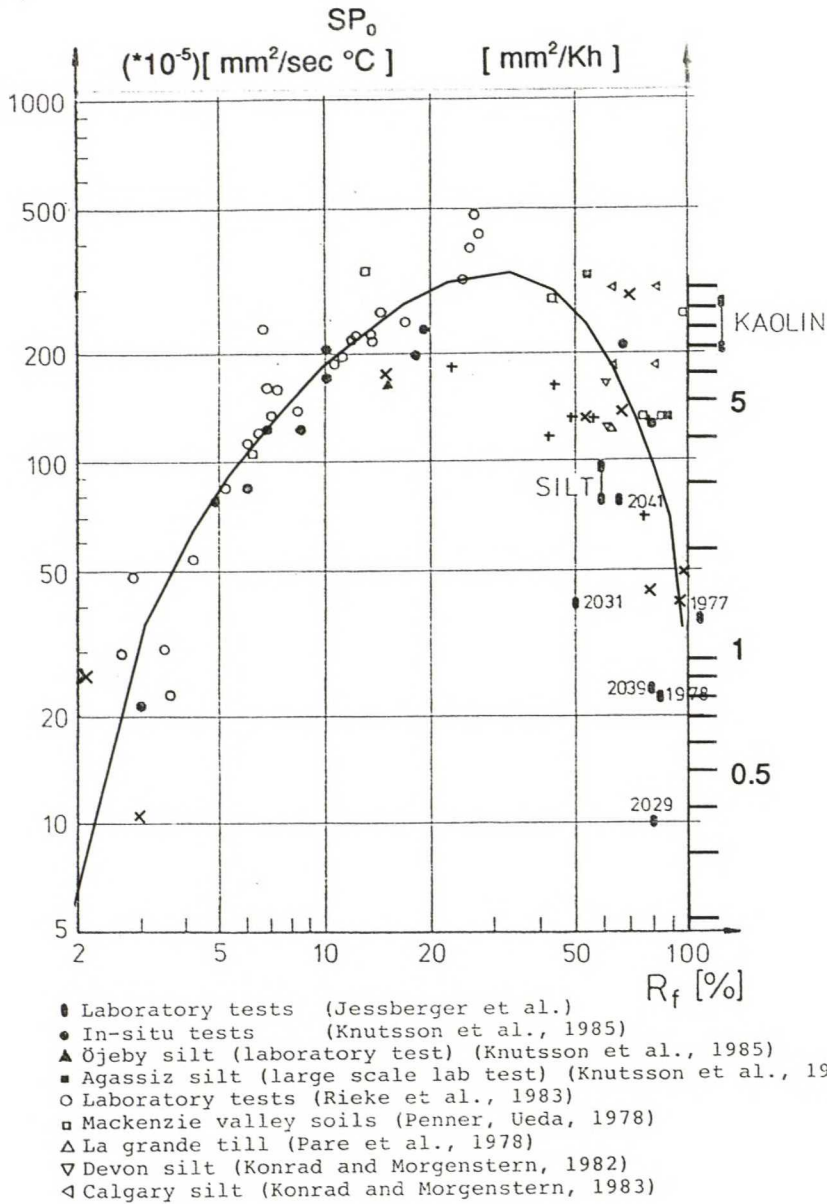
$$A = -1.873$$

$$B = 1.10484$$

$$C = -3.14753 * 10^{-2}$$

$$D = 3.26393 * 10^{-4}$$

$$E = -1.18965 * 10^{-6}$$

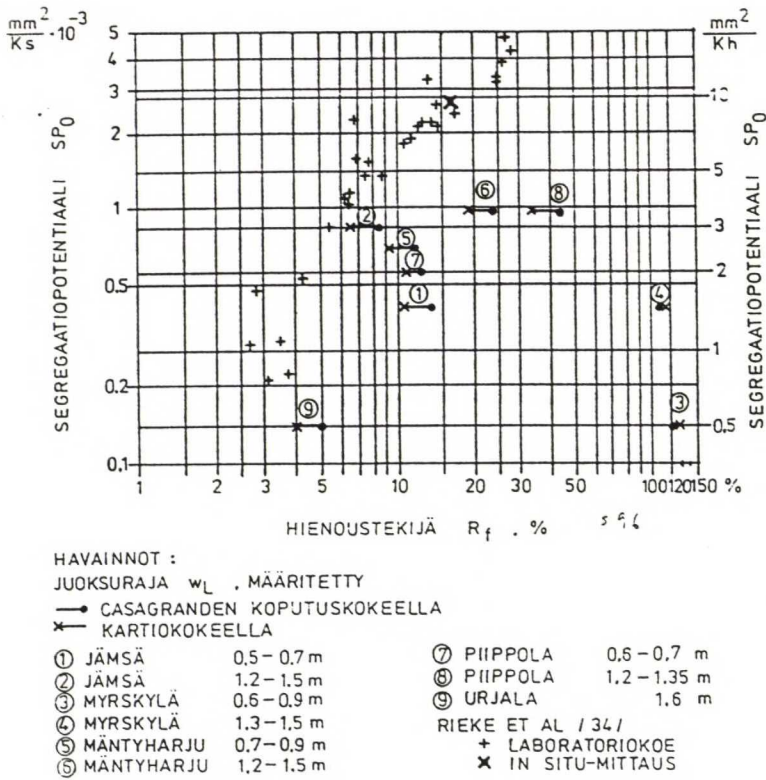


x Laboratoriokokeet, /Hentilä 1995 ja Palolahti et al. 1993/

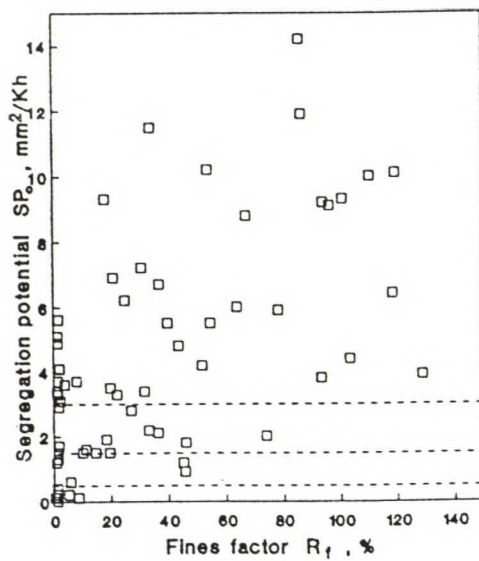
+ Laboratoriokokeet, /Saarelainen ja Toivonen 1991/

Kuva 5.8. Segregaatiopotentiaalin ja hienoustekijän välinen vuorosuhde eri tutkijoiden mukaan sekä kaavan 5.14 kuvaaja.

Friberg et al. /1989/ on myös tutkinut routivuuskriteerien kehittämisprojektissa edellä olevaa yhteyttä segregaatiopotentiaalin ja hienoustekijän välillä ja päätenyt suomalaisista maalajeista rakennetuilla näytteillä hieman alempiin segregaatiopotentiaalin arvoihin (kuva 5.9). Kuvassa 5.10 on Kujalan /1991/ saama vuorosuhde samoille tekijöille. Kuvasta ei voi havaita samanlaista yhteyttä kuin kuvien 5.8 ja 5.9 koetuloksista.



kuva 5.9. Segregaatiopotentiaali hienoustekijän funktiona /Friebert et al. 1989/.



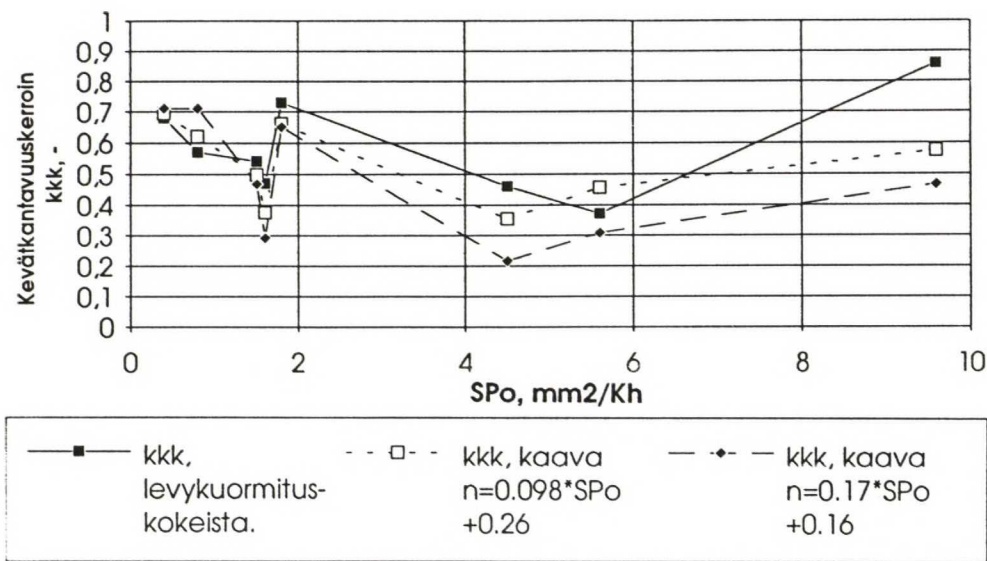
Kuva 5.10. Segregaatiopotentiaalin ja hienoustekijän välinen suhde /Kujala 1991/.

Taulukossa 5.8 on esitetty Palolahti et al:n /1993/ esittämän mallin (kaava 5.10) mukaan määritetyt kevätkantavuuskertoimen arvot, kun segregaatiopotentiaali on määritetty hienoustekijän avulla kuvasta 5.8 ja kerroin n segregaatiopotentiaalin avulla kuvan 5.6 yhtenäisellä viivalla piirretystä kuvaajasta, jossa Oulun kohteet on huomioimatta.

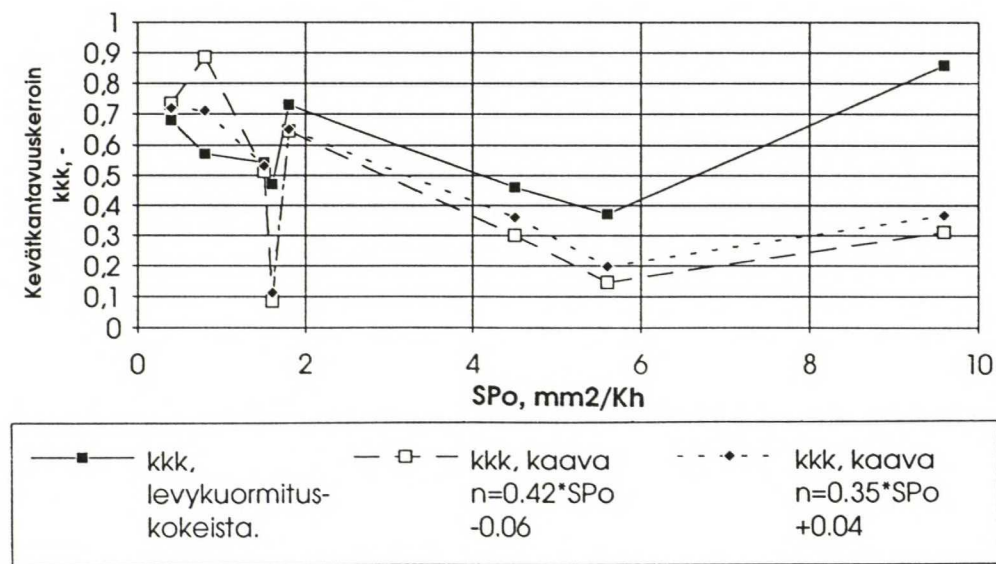
Taulukko 5.8. Kevätkantavuuskertoimen laskenta. Tutkimusten /Hentilä 1995/, /Palolahti et al. 1993/ ja /Saarelainen ja Toivonen 1991/ havainnot.

Tutkimus- kohde	Rf %	Sp ₀ mm ² /Kh	n -	γ kN/m ³	z m	kkk -	kkk -
	lähtöarvo	kuvasta 5.8	kuvasta 5.6	lähtöarvo	lähtöarvo	kaava 5.10	levyk. kokeista
Kontula	96.7	1.8	0.43	20	0.4	0.50	0.54
N-P	50.6	7.46	0.99	20	0.7	0.35	0.46
P-O pl 100+17	100	1.5	0.41	20	0.72	0.66	0.73
P-O pl 114+80	80	3.3	0.58	20	0.37	0.38	0.47
P-O pl 100+40	3.0	1.0	0.36	20	0.42	0.69	0.68
Otaniemi	2.05	0.25	0.28	20	0.37	0.62	0.57
Jyväskylä	64.1	5.0	0.75	20	1.0	0.60	0.70
Oulunsuu	13.5	8.2	1.06	20	0.95	0.45	0.37
Kempele- Oulunsalo	65.9	5	0.75	20	0.95	0.57	0.86
VT 3 pl:							
66000-66800	91.3	2.1	0.46	20	1.2	0.79	-
73035-73270	78.6	3.5	0.60	20	1.2	0.74	-
76760-77160	84.6	2.7	0.52	20	1.2	0.77	-
77480-77550	55	7.1	0.95	20	1.2	0.62	-
79200-79250	72.1	4.1	0.66	20	1.2	0.71	-
66203, v 41.5m	76	4.0	0.65	20	1.2	0.72	-
67450, vas 30m	76.7	4.0	0.65	20	1.2	0.72	-
73260, vas 25m	40.2	9.5	1.19	20	1.2	0.54	-
75600, vas 10m	41.0	9.4	1.18	20	1.2	0.55	-
76300, vas 10m	53.2	7.3	0.97	20	1.2	0.61	-
77360, vas 60m	46.3	8.1	1.05	20	1.2	0.58	-
79500, vas 10m	20.9	10.5	1.28	20	1.2	0.52	-

Kuvassa 5.11 on esitetty kohteittain levykuormituskokeista lasketut kevätkantavuuskertoimet, kaavalla 5.10 arvioidut kertoimet ja näitä vastaavat segregatiopotentiaalit SP_0 . Kuvasta huomataan, että kaavalla 5.10 lasketut kevätkantavuuskertoimet eroavat vähemmän levykuormituskokeilla määritetyistä kertoimista, kun käytetään kuvasta 5.6 saatavaa n kerrointa, jossa Oulunsuun ja Kempele-Oulunsalon kohteet on huomioimatta.



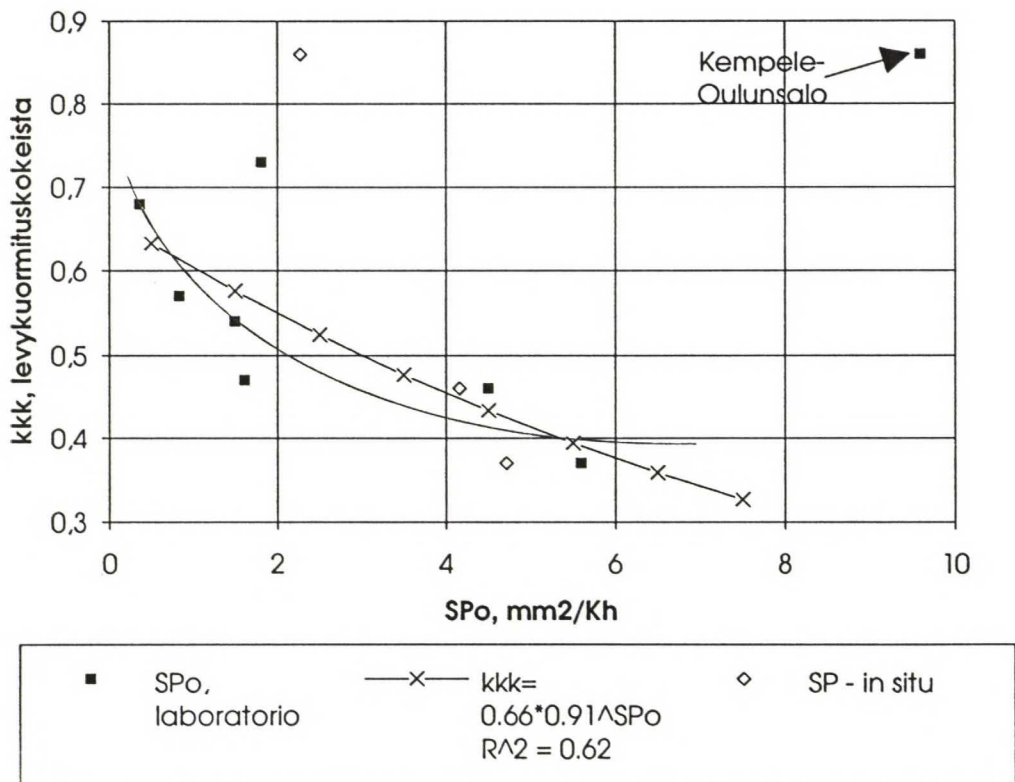
Kuva 5.11. Levykuormituskokeilla ja kaavalla 5.10 määritettyjen kevätkantavuuskertoimien ja laboratoriossa määritettyjen segregatiopotentiaalien välinen vuorosuhde. Kokonaisjännityksenä on käytetty vakioarvoa 40 kPa.



Kuva 5.12. Levykuormituskokeilla ja kaavalla 5.10 määritettyjen kevätkantavuuskertoimien sekä laboratoriossa määritettyjen segregatiopotentiaalien välinen vuorosuhde. Kokonaisjännityksenä on käytetty laskettuja arvoja ($\gamma_z + \Delta\sigma$).

Kuvassa 5.12 on esitetty kohteittain levykuormituskokeista lasketut kevätkantavuuskertoimet sekä kaavalla 5.10 arvioidut kertoimet, kun kokonaisjännityksenä on käytetty laskettuja arvoja.

Koska kevätkantavuuskerroin riippuu pääasiassa maan routivuudesta, se on riippuvainen routanoususta ja segregatiopotentiaalista. Havaittu yhteys riippuu myös kunkin havaintokauden sääolosuhteista, joten eri havaintokausilta saadut tulokset voivat poiketa toisistaan. Kuvassa 5.13 esitetyssä segregatiopotentiaalin ja kevätkantavuuskertoimen välisessä vuorosuhteessa Kempele-Oulunsalon piste eroaa huomattavasti muista, joten sitä ei ole huomioitu teoreettista kuvaajaa laskettaessa. Kuvaan on lisätty käsinpiirretty käyrä kuvaamaan vuorosuhdetta.



Kuva 5.13. Kevätkantavuuskertoimen ja segregatiopotentiaalin välinen vuorosuhde.

6. ROUDAN SYVYYDEN JA ROUTANOUSUN ARVIOIMINEN

6.1 Maan lämpötekniisiin ominaisuuksiin ja pakkasmäärään perustuvat menetelmät

6.1.1 Roudan syvyyden arviointi

a) Stefan'in yhtälö

Stefanin mukaan roudan syvyys voidaan arvioida pakkasmäärään ja vakiokertoimeen perustuvilla kaavoilla 6.1 ja 6.2 /Stefan 1890/. Saarelainen /1992/ ja McCormick /1993/ ovat tutkimuksissaan käyttäneet kaavan 6.1 yhtälöä roudan syvyyden ja k-kertoimen suhdetta arvioitaessa. Lisäksi Orama on vuosina 1958 - 1993 havainnoinut k-kertoimen arvoja eri maalajeilla. Ennen julkaisemattomat havainnot on esitetty taulukossa 6.1.

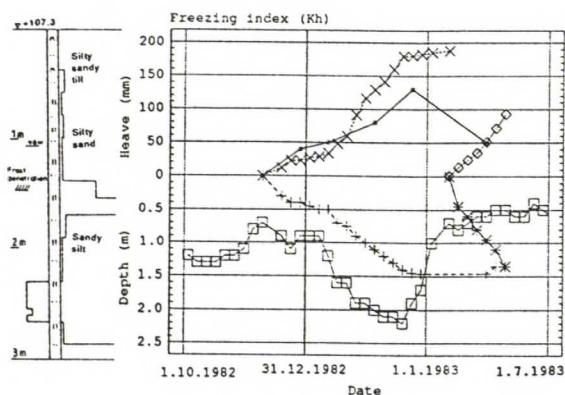
$$z_f = k\sqrt{F} \quad (6.1)$$

$$k = f(\lambda, q) \quad (6.2)$$

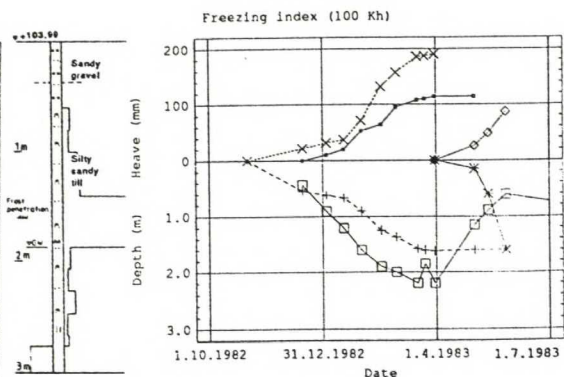
z_f	on	roudan syvyys, m
k		kerroin, $m/(Kh)^{0.5}$
F		pakkasmäärä, Kh
λ_f		jäätyneen maan lämmönjohtavuus, W/mK
q		maaperän jäätymislämpö, Wh/m ³

Saarelaisen tutkimukset sijoittuvat Alajärvelle, Piippolaan ja Joensuuhun. Kuvassa 6.1 on esitetty kohteiden maapohjan profiili, havaitut roudan syvyydet ja pakkasmäärä. Kuvassa on esitetty tämän lisäksi routanousu, sulamissyvyys ja pohjaveden korkeusasema. Saarelaisen tuloksissa on kaavan 6.1 k-kertoimen lisäksi vakiotermi, joka on vaihdellen välillä -50 ... + 126 mm. Tässä tarkastellaan havaintojen toimivuutta huomioimalla ainoastaan k-kerroin. Kertoimet on esitetty maalajeittain taulukossa 6.1.

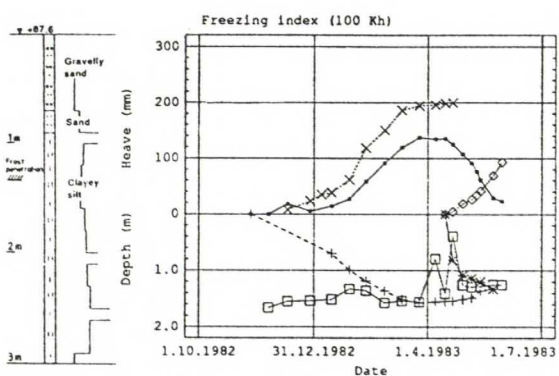
a) Alajärvi



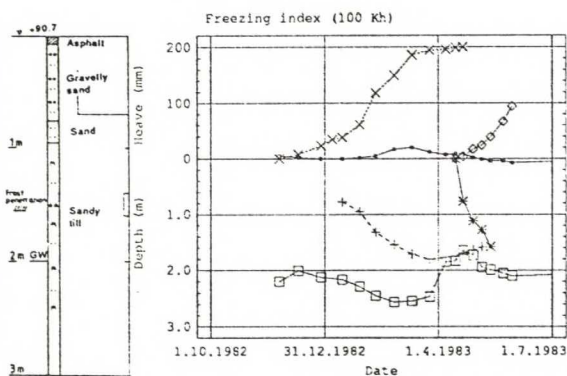
b) Piippola



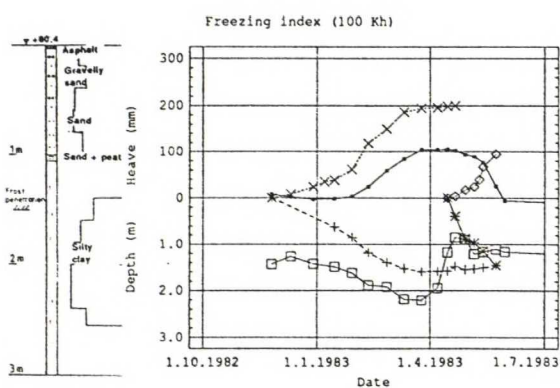
c) Joensuu p. 14



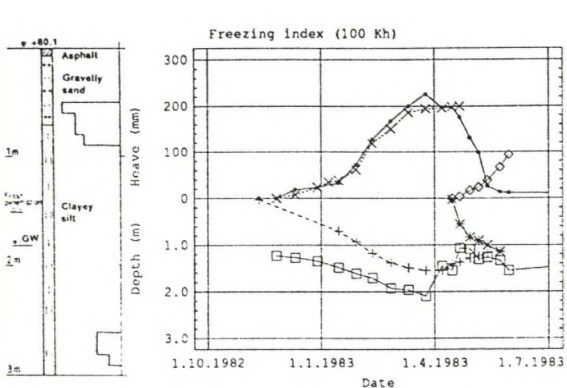
d) Joensuu p.20



e) Joensuu p.33



f) Joensuu p.38



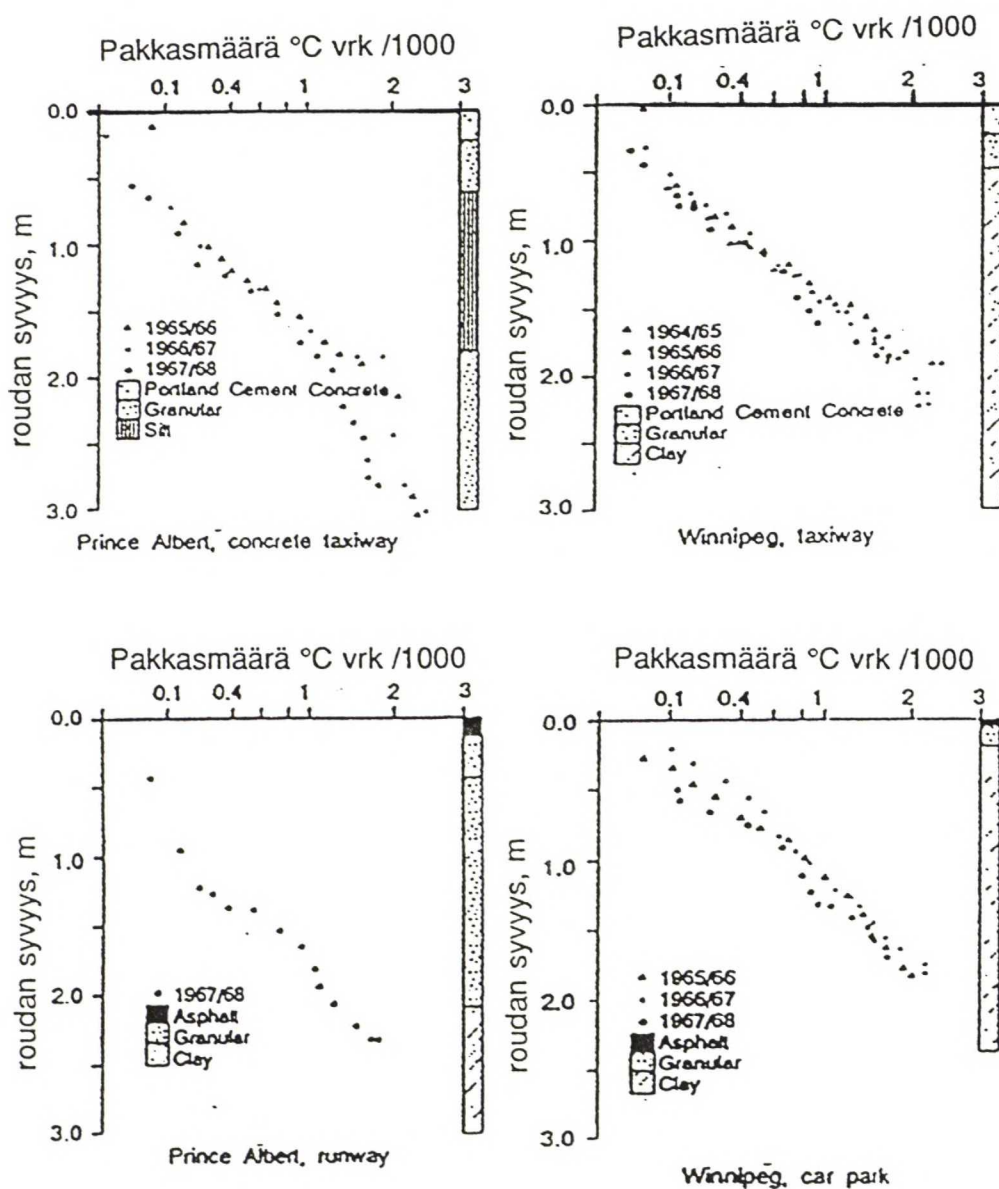
⊖ Frost heave
+ Frost penetration

× Thaw penetration
□ Ground water depth

× Freezing index
◇ Thawing index

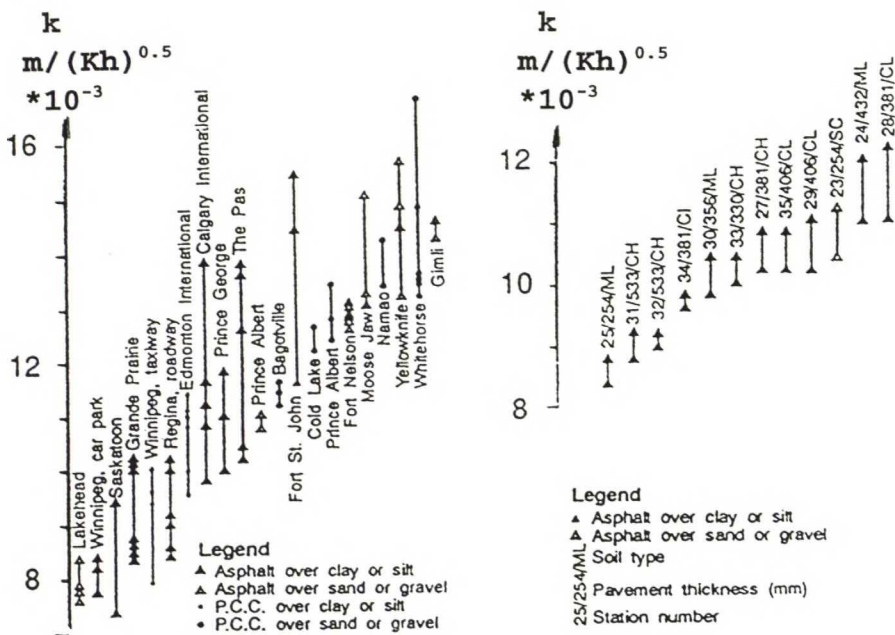
Kuva 6.1. Routahavainnot talvella 1982-1983 Alajärvellä, Piippolassa ja Joensuussa /Saarelainen 1992/.

McCormick on tutkinut roudan syvyyttä pakkasmäärän suhteen 19 Kanadan lentokentällä ja 12 kohteessa Saskatchewan valtateillä. k-kertoimen määrittämiseen Kanadan lentokentillä käytettiin vuosien 1965-1970 aikana kerättyjä tietoja. Roudan syvyys määritettiin Gandahlin routaputkia käyttäen. Mittaukset tehtiin lumelta auratuilla alueilla, joiden päällysrakenteena oli asfaltti tai betoni. Roudan syvyyttä mitattiin viikottain ensimmäisistä pakkasista lähtien roudan sulamiseen asti. Jokaisella lentokentällä oli sää-asema. Päivän keskilämpötilat saatiin kuukausittaisista Kanadan ympäristö- raporteista. Roudan syvyyttä mitattaessa laskettiin sen hetkinen pakkasmäärä. Näistä havaintopareista piirrettiin kuvan 6.2 mukaiset kuvaajat. Samassa kuvassa on esitetty lentokenttien tutkimuspisteiden maapohjan profiili.



Kuva 6.2. Roudan syvyys pakkasmäärän suhteen /McCormick 1993/.

Kertoimen k arvo laskettiin näistä kuvaajista niinä talvina, kun mittauksia tehtiin. Kuvasta 6.2 huomataan, että Prince Albertin lentokentällä k -arvolle saadaan merkittävä ero, kun verrataan asfaltilla ja betonilla päällystettyä maapohjaa. Winnipegin lentokentällä ei samanlaista eroa havaita päällysmateriaalien vaikutuksesta. Tämä selittyy sillä, että asfaltti absorboi auringon valoa enemmän kuin betoni. Winnipegissä sensijaan oletetaan asfaltin ja betonin tummuuden tasoittuneen ajan kuluessa lian vuoksi /McCormick 1993/. Kertoimen k arvot, maapohjan vallitseva tyyppi, pakkasmäärä ja roudan syvyys eri lentokentillä ja valtateilla on esitetty liitteissä 9 ja 10. Kertoimen k vaihtelua on esitetty kuvassa 6.3.



Kuva 6.3. k -kertoimen arvoja päällysrakenteen ja maapohjan vaihdellessa Kanadan lentokentillä ja Saskatchewan valtateilla /McCormick 1993/.

Saskatchewan valtateilla mitattiin roudan syvyyksiä vuosina 1963-1965 /Culley 1967/. Kaikissa kohteissa oli soran päällä asfaltti. Rakenteen paksuus oli vaihdellen 254 ja 533 mm.

Kuvasta 6.3 huomataan, että teillä tehdyissä mittauksissa k -arvojen hajonta on pienempi kuin lentokentillä tehdyissä. Tämä voi johtua siitä, että tien rakenne on yksinkertaisempi kuin lentokentän rakenne /McCormick 1993/.

McCormick'in tuloksista on laskettu kertoimelle k keskiarvoja erilaisissa maalajeissa. Nämä arvot ja havaintojen määrät on esitetty taulukossa 6.1.

Taulukko 6.1. *k*-kertoimen arvoja McCormick:in, Saarelaisen ja Oraman mukaan erilaisille maalajeille.

	McCormick /1993/		Saarelainen /1992/		Orama, havaintoja vv. 1958-1993	
Maalaji	havaintojen määrä	$k\text{-kerroin } m \cdot (Kh)^{-0.5} \cdot 10^{-3}$	havaintojen määrä	$k\text{-kerroin } m \cdot (Kh)^{-0.5} \cdot 10^{-3}$	havaintojen määrä	$k\text{-kerroin } m \cdot (Kh)^{0.5} \cdot 10^{-3}$
Sa	42	10.2			3	9.6-10.1
Sa hyvin plastinen	10	9.7				
Sa vähän plastinen	6	10.9				
siSa			2	10.7		
saSi			4	9.8-10.7	1	6.2
Si vähän plastinen	6	10.0				
hkSi	5	12.0			9	8.1
saHk	2	10.8				
siHk(Mr)			36	10.5-11.6	14	10
Hk	32	12.9	2	11.2	16	11.4
Sr					4	13.9
SiMr					6	8.4
HkMr					9	12.3

Verrattaessa tässä työssä tutkittujen kohteiden maalajeja McCormick:in ja Oraman aineistojen maalajeihin saadaan keskimääräisen *k*-arvon ja pakkasmäärän avulla laskettua Stefanin yhtälöllä taulukon 6.3 (s. 57) routasyvyyydet. Laskelmissa on huomioitu rakennekerros siten, että *k*-kertoimenä on käytetty hiekan ja vallitsevaa pohjamaata vastaavan *k*-kertoimen maakerrosten paksuudella painotettua arvoa. Pakkasmäärä on laskettu Ilmatieteen laitoksen antamien vuoden 1990-1991 vuorokausilämpötilojen perusteella. - Saarelaisen /1992/ ja Friberg et al:n /1989/ kohteiden vastaavat roudan syvyyydet on esitetty taulukossa 6.4 (s. 58).

b) Muunnettu Berggren'in yhtälö

Phukan /1985/ käyttää roudan syvyyttä laskiessaan muunnettua Berggrenin yhtälöä (kaavat 6.3 - 6.6). Tällä yhtälöllä saadaan roudan syvyyden lisäksi laskettua sulamissyvyys, jolloin pakkasmäärän tilalla käytetään lämpöastesummaa [$^{\circ}\text{Ch}$].

$$z_f = \Lambda \sqrt{\frac{7200\lambda_{av}nF}{L}} \quad (6.3)$$

$$\Lambda = f(\alpha, \mu) \quad (6.4)$$

$$\alpha = \frac{V_0}{V_s} \quad (6.5)$$

$$\mu = \frac{C_{av}}{L} * V_s \quad (6.6)$$

z_f	on	roudan syvyys, m
λ_{av}		maan keskimääräinen lämmönjohtavuus, W/mK
n		kerroin, joka huomioi maanpinnan peitteen, -
F		ilman pakkasmäärä, Kh
L		maaperässä olevan veden jäätymislämpö, J/m ³
Λ		lämpövakio, α :n ja μ :n funktio, kuvasta 6.4.
α		lämpösuhde, -
μ		parametri, -
V_0		tutkimuskohteen vuosittainen keskimääräinen lämpötila, $^{\circ}\text{C}$
V_s		pakkaskauden keskilämpötila, $^{\circ}\text{C}$
C_{av}		maan keskimääräinen tilavuuslämpökapasiteetti, J/m ³ K

Maan lämmönjohtavuudet saadaan laskettua mm. Kerstenin vuonna 1949 kokeellisesti määrittämillä kaavoilla. Kaavassa 6.3 käytetty keskimääräinen lämmönjohtavuus saadaan jäätyneen ja sulan maan lämmönjohtavuuksien keskiarvosta. Kaavoilla 6.7 ja 6.8 saadaan hienorakeisen maalajin lämmönjohtavuudet kuivairtoteiheyden ja vesipitoisuuden avulla.

$$\lambda_u = (0.13 * \log w - 0.029) * 10^{0.62 * \rho_d} \quad (6.7)$$

$$\lambda_f = 0.00144 * 10^{1.373 \rho_d} + 0.01226 * 10^{0.499 \rho_d} * w \quad (6.8)$$

Karkearakeisten maalajien lämmönjohtavuudet saadaan laskettua kaavojen 6.9 ja 6.10 avulla.

$$\lambda_u = (0.10 * \log w + 0.058) * 10^{0.62 * \rho_d} \quad (6.9)$$

$$\lambda_f = 0.01096 * 10^{0.8116 \rho_d} + 0.00461 * 10^{0.9115 \rho_d} * w \quad (6.10)$$

λ_u	on	sulan maan lämmönjohtavuus, W/mK
λ_f		jäätyneen maan lämmönjohtavuus, W/mK
ρ_d		kuivairtitiheys, g/cm ³
w		vesipitoisuus, paino%

Lämmönjohtavuudet saadaan myös liitteen 8 käyrästä.

Sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti lasketaan kaavalla 6.11 ja jäätyneen maan vastaava arvo kaavalla 6.12 /Talonrakennuksen routasuojausohjeet 1987/. Kaavassa 6.6 oleva keskimääräinen tilavuuslämpökapasiteetti saadaan sulan ja jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteettien keskiarvosta.

$$C_u = \frac{\rho_d}{\rho_w} * (0.18 + 1.0 * \frac{w}{100}) * C_w \quad (6.11)$$

$$C_f = \frac{\rho_d}{\rho_w} * (0.18 + 0.5 * \frac{w}{100}) * C_w \quad (6.12)$$

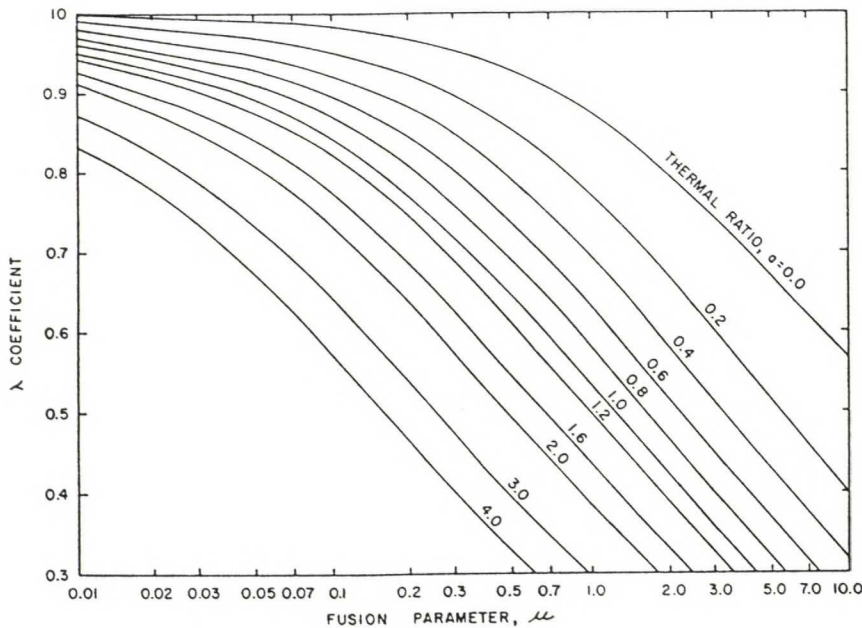
C_u	on	sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti, MJ/m ³ K
C_f		jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetti, MJ/m ³ K
C_w		veden tilavuuslämpökapasiteetti, 4.19 MJ/m ³ K
ρ_d		kuivairtitiheys, g/cm ³
ρ_w		veden tiheys, 1 g/cm ³

Maan jäätymisessä vapautuva lämpöenergia eli faasinmuutoslämpö saadaan yhtälöstä 6.13.

$$L = \rho_d * \frac{w}{100} * L_w \quad (6.13)$$

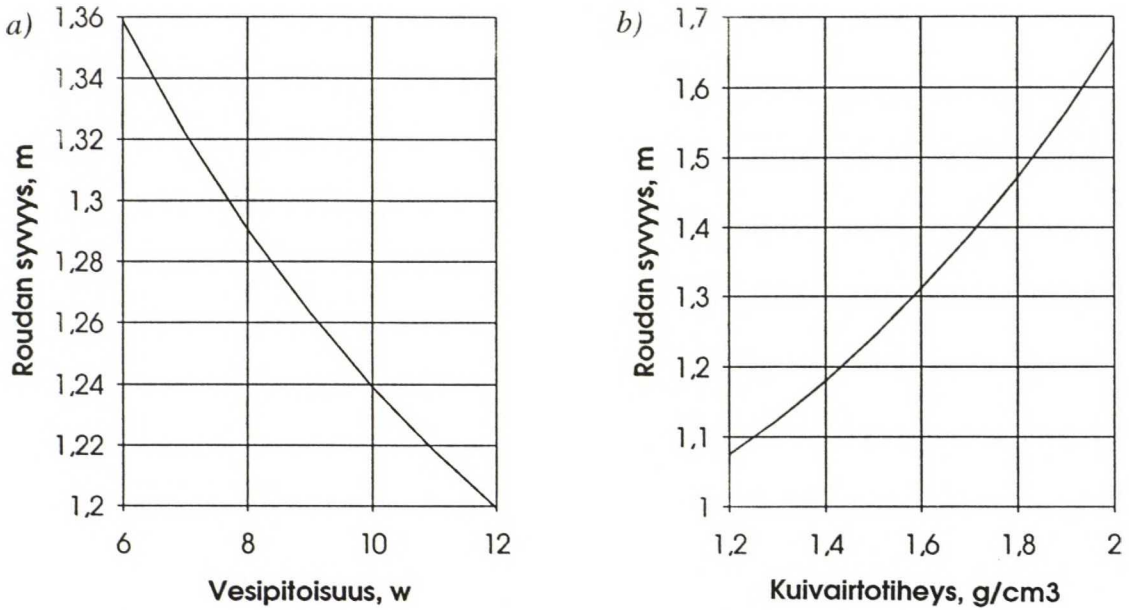
L	on	maaperässä olevan veden jäätyislämpö, MJ/m ³
L_w		veden jäätyislämpö, 334 kJ/kg

Lämpövakio Λ saadaan kuvan 6.4 mukaisesti parametrin μ ja lämpösuhteen α funktiona.



Kuva 6.4. Lämpövakio Λ parametrien α ja μ suhteen /Phukan 1985/

Tällä menetelmällä lasketut roudan syvyydet on esitetty taulukoissa 6.3 ja 6.4. Laskelmissa on käytetty lähtöarvoina rakennekerroksen ja pohjamaan paksuudella painotettuja keskiarvoja. Kuvassa 6.5 on esitetty vesipitoisuuden ja kuivairtitiheyden vaikutus roudan syvyyteen Otaniemen kohteessa.



Kuva 6.5. Roudan syvyys muunnetulla Berggren'in yhtälöllä Otaniemen kohteessa.

a) Vesipitoisuuden vaikutus roudan syvyyteen. b) Kuivairtitiheyden vaikutus roudan syvyyteen.

c) Roudan syvyys kerroksellisessa maassa

Roudan syvyys useampikerroksellisessa maarakenteessa voidaan laskea kaavojen 6.14 - 6.21 avulla. Mikäli maa ei ole täysin jäätynyt, voidaan maan lämmönjohtavuus laskea kaavalla 6.14 sulan ja jäätyneen maan lämmönjohtavuuksista jäätyneessä maassa sulana pysyvän veden määrän avulla /Helander 1985/.

$$\lambda_t = \lambda_f + (\lambda_u - \lambda_f) * \frac{w_u}{w} \quad (6.14)$$

λ_t	on	lämmönjohtavuuden laskenta-arvo, W/mK
λ_f		jäätyneen maan lämmönjohtavuus, W/mK
λ_u		sulan maan lämmönjohtavuus, W/mK
w_u		jäätymättömän veden määrä, %
w		vesipitoisuus, %

Jäätymättömän veden määrä saadaan kaavasta 6.15 /Andersland et al. 1978/. Kaavalla lasketut arvot on esitetty taulukossa 6.2, jossa on myös Kujalan /1991/ aineiston perusteella (liite 11) arvioidut jäätymättömän veden määrät kohteittain. Kujala määrittä jäätymättömän veden määrän jäätyneessä maanäytteessä NMR-menetelmällä (nuclear

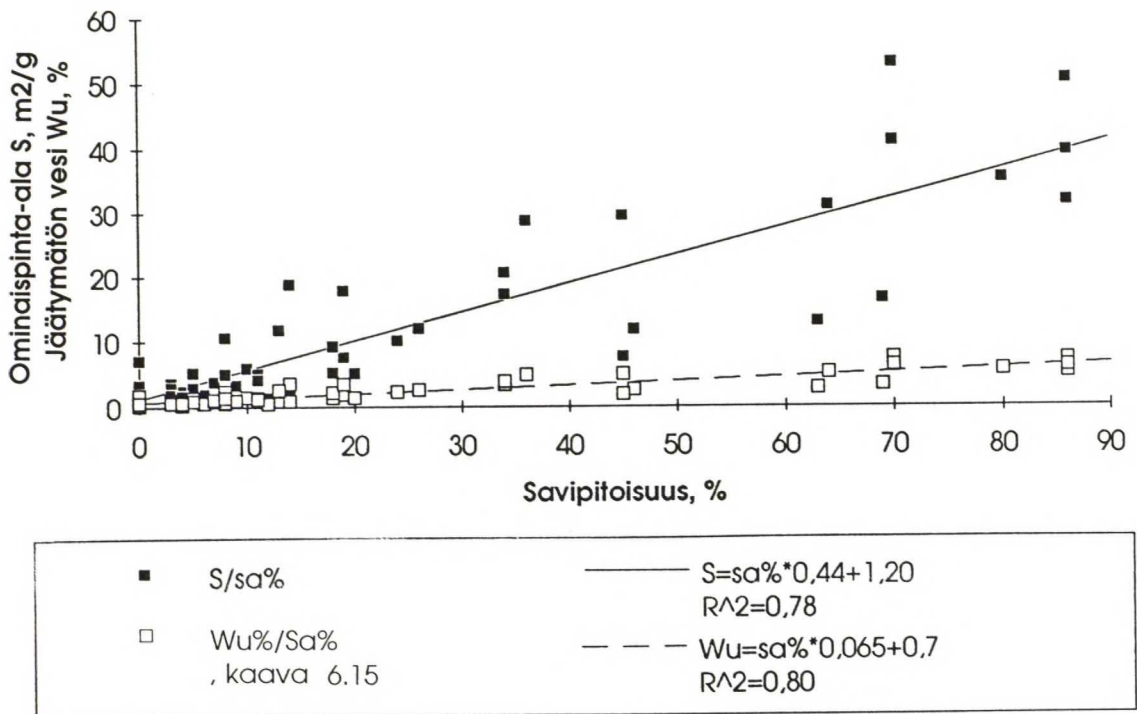
magnetic resonance). Kuvasta 6.6 voidaan havaita Kujalan tutkiman aineiston ominaispinta-alan ja savipitoisuuden välinen yhteys (kaava 6.16). Kun Kujalan havaintoaineiston maalajeille lasketaan jäätymättömän veden määrät ominaispinta-alojen perusteella kaavalla 6.15 saadaan selvä yhteys myös jäätymättömän veden määrän ja savipitoisuuden välille (kuva 6.6). Näinollen jäätymättömän veden määrä voidaan likimääräisesti arvioida myös saadun kaavan 6.17 avulla ($R^2=0.8$).

$$w_u = e^{0.2618 + 0.5519 \cdot \ln S - 1.449 \cdot S^{-0.264} \cdot \ln |T|} \quad (6.15)$$

$$S = sa\% \cdot 0.44 + 1.2 \quad (6.16)$$

$$w_u = sa\% \cdot 0.065 + 0.66 \quad (6.17)$$

w_u on jäätymättömän veden määrä, %
 e neperin luku, -
 S maan ominaispinta-ala, m^2/g
 T lämpötila, $-2.5^\circ C$
 $sa\%$ savipitoisuus, %



Kuva 6.6. Ominaispinta-alan ja savipitoisuuden välinen suhde Kujalan /1991/ aineiston perusteella sekä kaavalla 6.15 lasketut jäätymättömän veden määrät.

Eri menetelmillä arvioidut jäätymättömän veden määrät vastaavat Kontulan, Nummi-Pusulan ja Jyväskylän kohteissa kohtalaisen hyvin toisiaan. Oulunsuun ja Kempele-Oulunsalon kohteiden arvoissa on suurempaa eroa. Edellämainittujen kohteiden maalajeja oli Kujalan aineistossa edustettuna vähän (2-3), joten valittu indeksi-arvo ei välttämättä ole lähellä oikeaa.

Taulukko 6.2. Jäätymättömän veden määrä kaavan 6.15 /Andersland et al. 1978/ ja 6.17 sekä Kujalan /1991/ aineiston perusteella.

Tutkimus- kohde	Savi- pi- toisuus, %	Ominais- pinta-ala S, m ² /g	Vesipi- toisuus w, %	Jäätymättömän veden suhteellinen määrä α , /Kujala 1991/, -	Jäätymättömän veden määrä, %		
					$\alpha \cdot w$ /Kujala 1991/	Kaava 6.15	Kaava 6.17
Kontula	77	48.5	50	0.142	7.1	6.9	5.7
Nummi- Pusula	15	5.16	29.5	0.064	1.9	1.4	1.6
P-O pl 100+17	37	-	23.8	0.014	0.33	-	3.1
P-O pl 114+80	47	-	33.2	0.014	0.46	-	3.7
P-O pl 100+40	0.6	-	21.5	0.014	0.31	-	0.7
Otaniemi	0.4	-	8.9	0.088	0.78	-	0.7
Jyväskylä	30.2	19.7	20.6	0.148	3.0	3.7	2.6
Oulunsuu	10	5.56	15.8	0.039	0.6	1.4	1.3
Kempele- Oulunsalo	28	21	31.1	0.014	0.44	3.8	2.7

Maan jäätyessä kerroksittain saadaan kunkin kerroksen olomuodonmuutoslämmöt laskettua kaavalla 6.18 /Talonrakennuksen routasuojausohjeet 1987/.

$$q = C_u * V_0 + w * \rho_d * q_w + 0.5 * C_f * |V_s| \quad (6.18)$$

q	on	olomuodonmuutoslämpö, Wh/m ³
V ₀		vuoden keskilämpötila, °C
V _s		pakkaskauden keskilämpötila, °C
w		vesipitoisuus, -
q _w		veden jäätyislämpö, 93 Wh/kg
C		maan tilavuuslämpökapasiteetti, Wh/m ³ K

Kerrosten jäätymiseen tarvittava pakkasmäärä saadaan kaavalla 6.19. Kun pakkasmäärä ei riitä jäädyttämään koko kerrosta lasketaan jäljellä oleva pakkasmäärä kaavalla 6.20 /Talonrakennuksen routasuojausohjeet 1987/.

$$F_n = q_n * d_n * \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{2 * \lambda_n} \right) \quad (6.19)$$

$$F_n = F - \sum_{k=1}^{n-1} F_k \quad (6.20)$$

F _n	on	osittain jäätyvään kerrokseen vaikuttava pakkasmäärä, Kh
F		pakkasmäärä, Kh
F _k		kerroksen k jäätymiseen tarvittu pakkasmäärä, Kh.

Roudan syvyys osittain jäätyvässä kerroksessa saadaan kaavalla 6.21 /Talonrakennuksen routasuojausohjeet 1987/.

$$d_n = -\lambda_n * \sum_{k=1}^{n-1} \frac{d_k}{\lambda_k} + \sqrt{\lambda_n^2 * \left(\sum_{k=1}^{n-1} \frac{d_k}{\lambda_k} \right)^2 + 2 * \frac{\lambda_n}{q_n} * F_n} \quad (6.21)$$

n	on	tarkasteltavan kerroksen numero, -
F _n		osittain jäätyvään kerrokseen vaikuttava pakkasmäärä, Kh
q _n		kerroksen n jäätyessä vapautuva lämpömäärä, Wh /m ³
d _k		kerroksen k paksuus, m
λ _k		kerroksen k lämmönjohtavuus, W/mK.

Taulukossa 6.3 on esitetty kaavalla 6.21 lasketut roudan syvyydet tutkituissa kohteissa vuoden 1990-1991 lämpötilatilastojen mukaan. Taulukoissa on myös vuonna 1991 mitatut routasyvyydet. Maakerrosten lämmönjohtavuudet on laskettu Kerstenin kaavojen 6.7 - 6.10 avulla. Jäätymättömän veden määrä on arvioitu Kujalan /1991/ aineiston perusteella (taulukko 6.2), koska kaikista kohteista ei ole määritetty ominaispinta-alaa. Pakkasmäärät saadaan taulukoista 5.1 ja 5.2 /Palolahti et al. 1993/. Saarelaisen ja Fribergin kohteiden vastaavat roudan syvyydet on esitetty taulukossa 6.4.

d) TVL:n Geotekninen mikro-ohjelmisto

TVL:n routamitoitusohjelma (versio 85.03) ottaa huomioon maapohjan kerroksellisuuden. Kaikista kohteista laskettiin roudan syvyys kyseisellä ohjelmalla. Saadut tulokset on taulukoissa 6.3 ja 6.4. Graafinen esitys tuloksista on esitetty kuvassa 6.7.

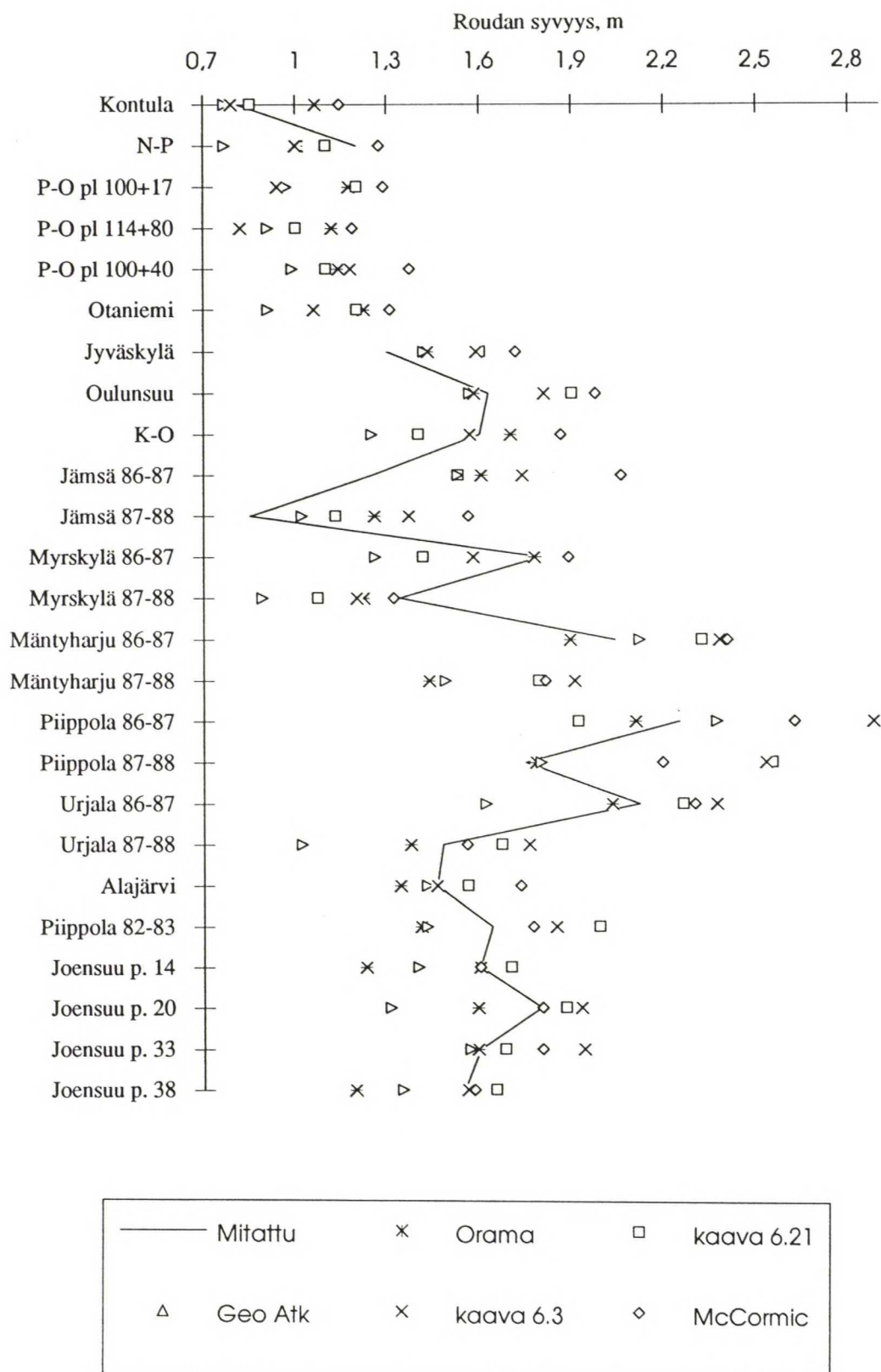
Taulukon 6.4 lopussa on laskettu kaikkien kohteiden (taulukot 6.3 ja 6.4) kunkin laskutavan aiheuttama keskipoikkeama. Pienin keskipoikkeama esiintyy käyttämällä Oraman /1993/ suosittelemia k-kertoimen arvoja.

Taulukko 6.3. Roudan syvyydet eri tutkimuskohteissa vuoden 1991 pakkasmäärillä laskettuna sekä samana vuonna mitatut roudan syvyydet.

Tutkimuskohde	Roudan syvyys, m					
	kaava 6.1 McCormick 1993	kaava 6.1 Orama 1993	kaava 6.3 Phukan 1985	kaava 6.21	Geo- ATK-oh- jelma	Mitatut v. 1991
Kontula	1.15	1.07	0.79	0.85	0.77	0.81
Nummi-Pusula	1.28	1.01	1.00	1.05	0.77	1.20
P-O pl 100+17	1.29	1.18	0.94	1.18	0.97	--
P-O pl 114+80	1.19	1.12	0.82	1.02	0.91	--
P-O pl 100+40	1.37	1.14	1.18	1.25	0.99	--
Otaniemi	1.31	1.23	1.06	1.36	0.91	--
Jyväskylä	1.72	1.43	1.59	1.60	1.42	1.30
Oulunsuu	1.98	1.58	1.81	1.88	1.57	1.63
Kempele- Oulunsalo	1.86	1.70	1.57	1.42	2.25	1.60

Taulukko 6.4. Friberg et al:n /1989/ ja Saarelaisen /1992/ tutkimusten kohteissa lasketut ja mitatut roudan syvyydet.

Tutkimuskohde	Roudan syvyys, m					
	kaava 6.1 McCormick 1993	kaava 6.1 Orama 1993	kaava 6.3 Phukan 1985	kaava 6.21	Geo- ATK-oh- jelma	Mitattu
Jämsä 86-87	2.06	1.61	1.74	1.53	1.53	1.25
Jämsä 87-88	1.56	1.26	1.37	1.13	1.02	0.85
Myrskylä 86-87	1.89	1.78	1.58	1.42	1.26	1.80
Myrskylä 87-88	1.32	1.22	1.20	1.07	0.89	1.34
M.harju 86-87	2.04	1.90	2.38	2.32	2.12	2.04
M.harju 87-88	1.81	1.44	1.91	1.79	1.49	-
Piippola 86-87	2.62	2.11	2.88	1.92	2.37	2.25
Piippola 87-88	2.20	1.78	2.53	2.55	1.80	1.75
Urzala 86-87	2.30	2.03	2.37	2.26	1.62	2.12
Urzala 87-88	1.56	1.38	1.76	1.67	1.02	1.48
Alajärvi	1.73	1.34	1.46	1.56	1.43	1.46
Piippola	1.77	1.41	1.85	1.99	1.43	1.64
Joensuu p. 14	1.60	1.23	1.60	1.70	1.40	1.60
Joensuu p. 20	1.80	1.59	1.93	1.88	1.31	1.80
Joensuu p. 33	1.80	1.59	1.94	1.68	1.57	1.60
Joensuu p. 38	1.58	1.20	1.56	1.65	1.35	1.55
Keskipoik- keama, m	0.258	0.172	0.253	0.234	0.241	



Kuva 6.7 Lasketut ja mitatut roudan syvyydet eri tutkimuskohteissa.

6.1.2 Routanousun arviointi

Saarelainen on johtanut routanousulle kaavan 6.22 mukaisen yhteyden segregatiopotentialin, pakkasmäärän ja k-kertoimen suhteen. Tällä kaavalla saadut routanousut on esitetty taulukossa 6.9. Segregatiopotentialin arvona on käytetty in situ arvoa. Kun sitä ei ole määritetty, on segregatiopotentialin arvo laskettu kaavalla 6.27 käyttäen kokonaiskuormituksen kaavalla 6.29 saatavaa arvoa. Niissä kohteissa, joissa on mitattu roudan syvyyksiä, k-arvo on ratkaistu kaavasta 6.1. Muissa kohteissa k-arvo on laskettu kaavalla 6.21 saadusta roudan syvyydestä.

$$\Delta h = \frac{(2 SP \sqrt{F})}{(k * 1000)} \quad (6.22)$$

Δh	on	routanousu, mm
SP		in situ segregatiopotentiali, mm ² /Kh
F		pakkasmäärä, Kh
k		kerroin, kaava 6.1

Roudan aiheuttama kokonaisnousu saadaan huokosveden jäätymisen ja routarintamaan johtuneen veden jäätymisen aiheuttamien nousujen summana kaavalla 6.23 /Konrad 1980/.

$$\Delta h = \Delta h_i + \Delta h_s \quad (6.23)$$

Δh	on	kokonaisnousu, mm
Δh_i		in situ jäätymisestä johtuva nousu, mm
Δh_s		segregaatoroutanousu, mm.

Huokosveden jäätymisestä johtuva routanousu saadaan kaavalla 6.24 /Nixon 1982/.

$$\Delta h_i = 0.09 * n * S_r * \frac{(w - w_u)}{w} * d \quad (6.24)$$

Δh_i on huokosveden jäätymisestä johtuva nousu, mm
 n huokoisuus, -
 S_r kyllästysaste, -
 w vesipitoisuus, -
 w_u jäätymättömän veden määrä, -
 d jäätyvän kerroksen alkuperäinen paksuus, mm

Routarintamaan johtuneen veden aiheuttama segregaatoroutanousu saadaan kaavalla 6.25 /Nixon 1982/.

$$\Delta h_s = 1.09 * \Delta t * SP * \nabla T_f \quad (6.25)$$

Δh_s on routarintamaan joutuvan veden aiheuttama segregaatoroutanousu, mm
 Δt tarkasteltava ajanjakso, h
 SP todellista kuormitusta vastaava segregaatiopotentiaali, mm²/Kh
 ∇T_f lämpötilagradientti jäätyneessä kerroksessa, K/mm.

Keskimääräinen lämpötilagradientti jäätyneessä kerroksessa saadaan kaavalla 6.26 /Konrad 1980/.

$$\nabla T_{f,n} = \frac{|V_s|}{\sum_{k=1}^{n-1} (d_k + \Delta h_k) + \frac{d_n}{2}} \quad (6.26)$$

$\nabla T_{f,n}$ on kerroksen n lämpötilagradientti, K /mm
 V_s pakkaskauden keskilämpötila, °C
 $d_{k,n}$ kerroksen k ja n alkuperäinen paksuus, mm
 Δh_k kerroksen k kokonaisnousu, mm

Segregaatiopotentiaalin arvoon vaikuttaa routarintaman päällä olevien maamassojen kuormitus. Kokonaiskuormitusta vastaava segregaatiopotentiaali saadaan kaavalla 6.27 /Jessberger et al. 1989/

$$SP_{\sigma} = SP_0 * e^{-a*\sigma} \quad (6.27)$$

SP_{σ}	on	segregaatiopotentiaali kuormalla σ , mm ² /Kh
σ		kokonaiskuormitus, MPa
SP_0		segregaatiopotentiaali 0-kuormalla, mm ² /Kh
e		neperin luku, -
a		kerroin, 1/MPa

Jessbergerin /1989/ mukaan kerroin a saadaan savipitoisuuden perusteella (kuva 6.8). Kerroin a (kaava 6.28) saadaan laskettua, mikäli routanousukokeita on tehty vähintään kahdella kuormitusportaalla. Taulukoissa 6.5 ja 6.6 on esitetty kohteiden savipitoisuudet ja laboratoriossa määritetyt segregatiopotentiaalit eri kuormitusportailla σ_1 ja σ_2 . Taulukoissa 6.7 ja 6.8 on kuvasta 6.8 ja kaavalla 6.28 saadut a -kertoimen arvot sekä kaavalla 6.27 lasketut segregatiopotentiaalit 70 kPa:n kuormituksella, joka on kaavalla 6.29 saatavan kokonaiskuormituksen keskimääräinen arvo tämän tutkimuksen kohteissa.

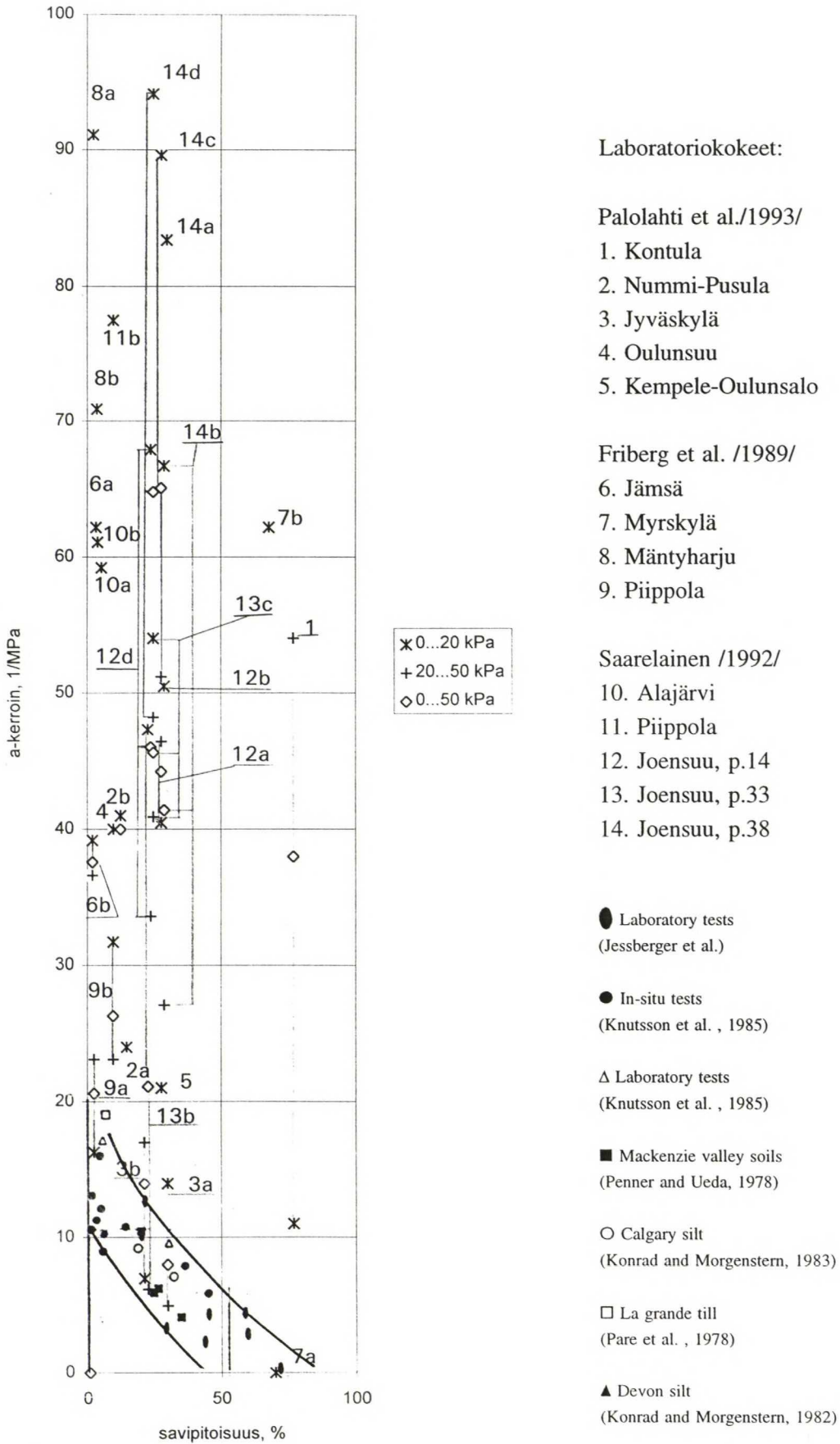
$$a = \frac{\ln\left(\frac{SP_{\sigma_1}}{SP_{\sigma_2}}\right)}{(\sigma_2 - \sigma_1)} \quad (6.28)$$

Taulukko 6.5. Tutkimusten Palolahti et al. /1993/, Hentilä /1995/ ja Friberg et al. /1989/ kohteiden maanäytteiden savipitoisuudet ja segregaatiopotentiaalit eri kuormitusportaita.

Tutkimuskohde	Syvyys m	Savi- pitoisuus %	SP _{0.003 Mpa} mm ² /Kh	SP _{0.02 Mpa} mm ² /Kh	SP _{0.05 Mpa} mm ² /Kh
Kontula	0.6-0.7	77	1.5	1.25	0.25
Nummi-Pusula	0.7-0.8 1.0-1.1	15 12.7	4.5 5	3 2.5	0 (0.004) 0.75
P-O pl 100+17	0.9	37	1.81		
P-O pl 114+80	0.7	47	1.61		
P-O pl 100+40	0.8	0.6	0.36		
Otaniemi	0.6	0.4	0.84		
Jyväskylä	1.5 1.7	30.2 21.6	4.75 4.25	3.75 3.75	3.25 2.25
			SP _{0.0023 Mpa} mm ² /Kh	SP _{0.02 Mpa} mm ² /Kh	SP _{0.05 Mpa} mm ² /Kh
Jämsä	0.5-0.7 1.2-1.5	3.4 2.1	1.5 3.0	0.5 1.5	- 0.5
Myrskylä	0.6-0.9 1.3-1.5	70.1 67.9	0.5 1.5	0.5 0.5	- -
Mäntyharju	0.7-0.9 1.2-1.4	2.4 3.7	2.5 3.5	0.5 1.0	- -
Piippola	0.6-0.7 1.2-1.35	2.6 9.9	2.0 3.5	1.5 2.0	0.75 1.0
Urkala	0.7 1.6	1.75 1.2	0 0.5		
			SP _{0.00175 Mpa}	SP _{0.0147 Mpa}	
Oulunsuu	1.2-1.4	10	5.6	3.33	
Kempele- Oulunsalo	1.2-1.4	28	9.6	7.3	

Taulukko 6.6. Saarelaisen /1992/ tutkimusten kohteiden maanäytteiden savipitoisuudet ja segregatiopotentiaalit eri kuormitusportaitailla.

Tutkimuskohde	Syvyys, m	Savi- pitoisuus %	SP _{0.003 Mpa} mm ² /Kh	SP _{0.02 Mpa} mm ² /Kh	SP _{0.05 Mpa} mm ² /Kh
Alajärvi	1.0	5.5	1.56	0.57	0 (0.004)
	1.1	4	6.92	2.45	0 (0.004)
	1.35	4	1.98	0 (0.004)	0 (0.004)
Piippola	0.75	5	7.08	0 (0.004)	0 (0.004)
	1.07	10	7.92	2.12	0 (0.004)
	1.3	12	9.23	1.42	0 (0.004)
Joensuu, piste 14	0.98	28	7.92	3.98	0.99
	1.1	29	3.68	1.56	0 (0.004)
	1.27	29	6.93	1.1	0 (0.004)
	1.4	24	4.95	1.56	0.57
Joensuu, piste 33	0.98	1	0 (0.004)	0 (0.004)	0 (0.004)
	1.17	23	12.59	5.63	4.67
	1.34	25	7.26	2.9	0.85
Joensuu, piste 38	0.74	30	6.44	1.56	0 (0.004)
	0.9	29	11.01	3.54	1.57
	1.05	28	5.96	1.3	0.28
	1.2	25	6.93	1.4	0.33



Kuva 6.8. a -kertoimen (kaava 6.28) ja savipitoisuuden välinen vuorosuhde /Jessberger 1989/. Kuvaan on lisätty tutkimuksien Friberg et al. /1989/, Palolahti et al. /1993/ ja Saarelainen /1992/ havainnot.

Taulukko 6.7. Kaavalla 6.28 lasketut ja savipitoisuuden mukaan kuvasta 6.8 määritetyt a -kertoimet sekä kaavalla 6.27 lasketut segregatiopotentialit 70 kPa kuormalla.

Tutkimus- kohde	Sy- vyys m	a-kerroin, kaava 6.28 MPa ⁻¹			a-kerroin, kuva 6.8, Mpa ⁻¹	SP _{0.07MPa} , mm ² /Kh	
		Kuormitusportaat σ ₁ ja σ ₂ : kPa 0-20 20-50 0-50				(a-kerroin lab. kok. mukaan)	(a-kerroin sa% mu- kaan)
Kontula	0.6-0.7	11	54	38	0.75	0.15	1.43
Nummi-Pusula	0.7-0.8	24	221	150	10	0.0007 *	2.3
	1.0-1.1	41	40	40	11	0.33	2.4
P-O pl 100+17	0.9				5	--	1.3
P-O pl 114+80	0.7				3	--	1.3
P-O pl 100+40	0.8				17.5	--	0.11
Otaniemi	0.6				20	--	0.22
Jyväskylä	1.5	14	5	8	6.5	2.6	3.1
	1.7	7	17	14	8.5	1.83	2.4
Jämsä	0.5-0.7	62			14.25	0.02	0.57
	1.2-1.5	39	37	38	15.75	0.23	1.03
Myrskylä	0.6-0.9	0			1	0.5	0.47
	1.3-1.5	62			1	0.02	1.40
Mäntyharju	0.7-0.9	91			15.25	0.01	0.89
	1.2-1.4	71			14	0.03	1.36
Piippola	0.6-0.7	16	23	21	14.5	0.52	0.75
	1.2-1.3	32	23	26	11.5	0.56	1.61
Urkala	0.7				16.2	--	0
	1.6				16.5	--	1.16
Oulunsuu	1.2-1.4	40			11.5	0.37	2.6
Kempele- Oulunsalo	1.2-1.4	21			6.5	2.3	6.2

* segregatiopotentialin arvo 0 on korvattu arvolla 0.004.

Taulukko 6.8. Kaavalla 6.28 lasketut ja savipitoisuuden mukaan kuvasta 6.8 määritetyt a-kertoimet sekä kaavalla 6.27 lasketut segregatiopotentiaalit 70 kPa kuormalla.

Tutkimus- kohde	Sy- vyys m	a-kerroin, kaava 6.28 MPa ⁻¹			a-kerroin, kuva 6.8, Mpa ⁻¹	SP _{0.07MPa} , mm ² /Kh	
		Kuormitusportaat σ ₁ ja σ ₂ : kPa 3-20 20-50 3-50				(a-kerroin lab. kok. mukaan)	(a-kerroin sa% mu- kaan)
Alajärvi	1.0	59	165	0	13.25	0	0.64
	1.1	61	214	0	14	0	2.71
	1.35	365	0	0	14	0	0.77
Piippola	0.75	440	0	0	13.25	0	2.91
	1.07	78	209	0	11.25	0	3.73
	1.3	110	196	0	10.75	0	4.49
Joensuu piste 14	0.98	40	46	1	6.5	0.42	5.12
	1.1	50	199	0	6.5	0	2.38
	1.27	108	187	0	6.5	0	4.48
	1.4	68	34	0.6	7.5	0.18	2.99
Joensuu piste 33	0.98	0	0	0	17	0	0
	1.17	47	6	5	7.5	2.38	7.62
	1.34	54	41	0.8	7	0.31	4.54
Joensuu piste 38	0.74	83	199	0	6.5	0	4.17
	0.9	67	27	2	6.5	0.54	7.12
	1.05	90	51	0.3	6.5	0.06	3.86
	1.2	94	48	0.3	7	0.07	4.34

Routarintamaa kuormittava kokonaiskuormitus saadaan kaavalla 6.29 /Chamberlain 1981/.

$$q = q_p + q_i$$

(6.29)

- q on

kokonaiskuorma, kPa
- q_p

routarintaman yläpuolisten maamassojen kuormitus, kPa
- q_i

imukuorma, kPa.

Routarintaman keskimääräisen syvyyden yläpuolisten maamassojen aiheuttama kuormitus saadaan kaavalla 6.30 /Nixon 1982/

$$q_{p,n} = \sigma_n = \sum_{k=1}^{n-1} (d_k \cdot \gamma_k + \frac{\Delta h_{s,k}}{1.09} \cdot \gamma_w) + \frac{d_n}{2} \cdot \gamma_n \quad (6.30)$$

$q_{p,n}$	on	kerroksen n keskimääräistä roudan syvyyttä vastaava yläpuolisten maamassojen kuormitus, kPa
γ_k		kerroksen k tilavuuspaino, kN/m ³
$\Delta h_{s,k}$		kerrokseen k joutuneen veden aiheuttama routanousu, m
γ_w		veden tilavuuspaino, 9.8 kN/m ³ .
$d_{k,n}$		kerroksen k ja n alkuperäinen paksuus, mm

Pohjavedenpinnan etäisyydestä ja roudan syvyydestä aiheutuva imukuormitus saadaan kaavalla 6.31 /Williams 1967/.

$$q_i = (H_1 - X_1) \cdot \gamma_w + (H_2 - X_2) \cdot \gamma_w \quad (6.31)$$

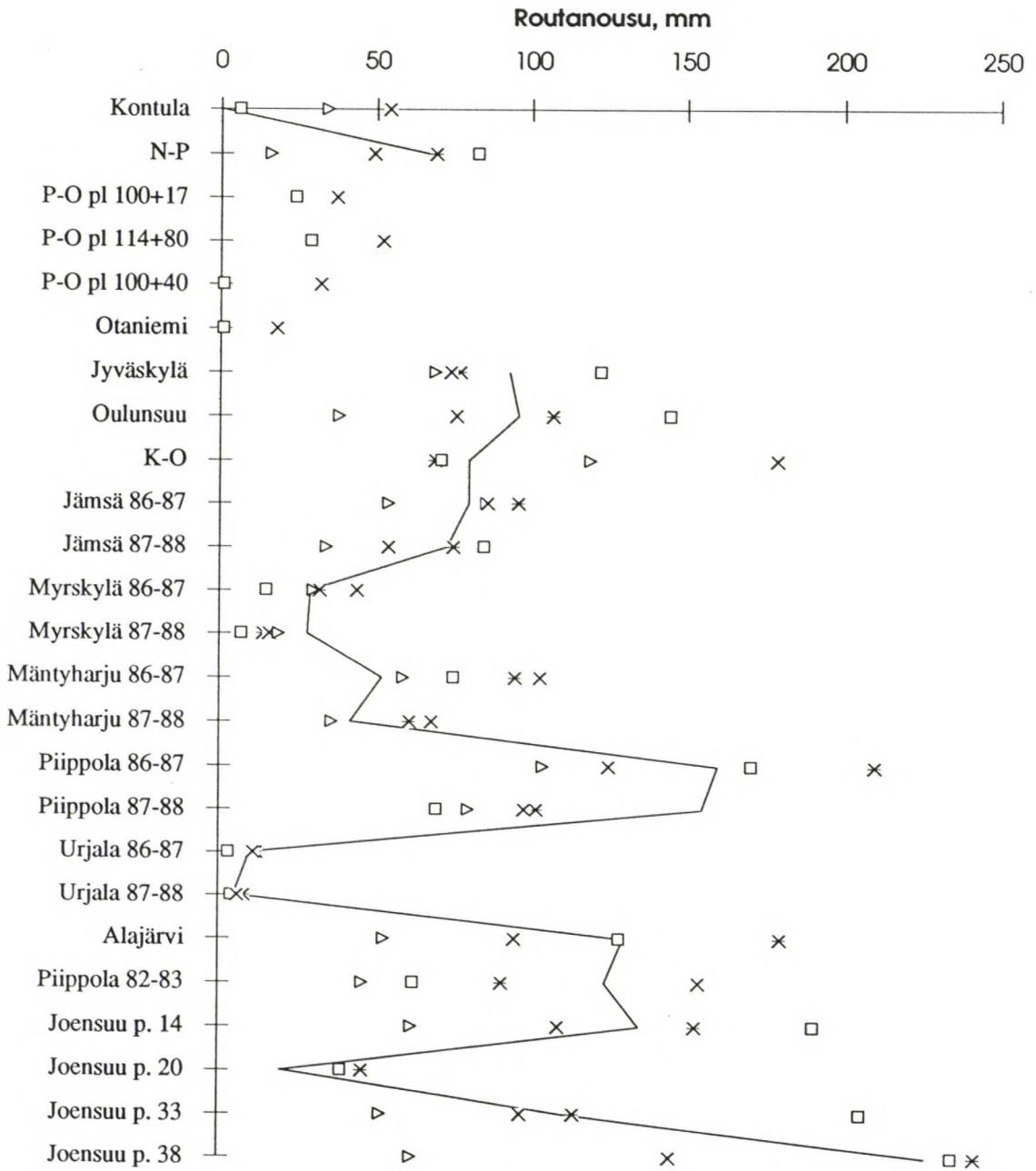
q_i	on	imukuormitus, kPa
$H_{1,2}$		pohjavedenpinnan syvyydet alkuperäisestä maanpinnasta routaantumisjakson alussa ja lopussa, m
$X_{1,2}$		routarintaman syvyys routaantumisjakson alussa ja lopussa, m

Taulukossa 6.9 on esitetty kaavalla 6.23 lasketut routanousut kussakin tutkimuskohteessa. Segregaatiopotentiaalina on käytetty in situ arvoa, silloin kun se on määritetty. Routanousut on lisäksi laskettu laboratoriossa määritetyn segregaatiopotentiaalin avulla, käyttäen kertoimen a arvona sekä laboratoriokokeiden perusteella laskettua että savipitoisuuden perusteella määritettyä arvoa. Taulukon lopussa on lisäksi kunkin menetelmän aiheuttama keskipoikkeama, joka on pienin käyttäen kaavaa 6.23 ja in situ segregaatiopotentiaaleja. Kuvassa 6.9 on esitetty tässä käytetyillä menetelmillä lasketut routanousut eri tutkimuskohteissa.

Eri tavoin määritettyjä segregaatiopotentiaalin arvoja verrattaessa havaitaan, että Jessbergerin /1989/ esittämä a-kertoimen ja savipitoisuuden välisen vuorosuhteen avulla määritetty $SP_{0.07\text{MPa}}$ vastaa yleensä paremmin in situ havaintojen avulla määritettyä segregaatiopotentiaalia kuin laboratoriokokeiden avulla määritetty $SP_{0.07\text{MPa}}$.

Taulukko 6.9. Kaavoilla 6.22 ja 6.23 lasketut sekä mitatut routanousut.

Tutkimuskohde	maalaji	In situ SP (Liite 1) mm ² /Kh	Routanousu, mm				
			kaava 6.22	kaava 6.23			Mitattu
				in situ SP	SP,sa%	SP,lab.	
Kontula	liSa	(0.23)	6	--	54	34	0,(34 v. 92)
Nummi-Pusula	saSi	4.16	83	69	49	16	67
P-O pl 100+17	laSa	(1.2)	24	--	37	--	--
P-O pl 114+80	laSa	(1.2)	29	--	52	--	--
P-O pl 100+40	siHk	(0.03)	1	--	32	--	--
Otaniemi	HkMr	(0.05)	1	--	18	--	--
Jyväskylä	saSi	4.02	122	77	74	69	93
Oulunsuu	hkSi	4.72	145	107	76	38	96
Kempele-Oulunsalo	laSa	2.27	71	69	179	119	80
Jämsä 86-87	Si	1.5	86	96	86	54	80
Jämsä 87-88	Si	1.9	85	75	54	34	73
Myrskylä 86-87	Sa	0.45	15	32	44	30	29
Myrskylä 87-88	Sa	0.35	7	14	16	19	28
Mäntyharju 86-87	siHkMr	2.2	75	95	103	59	52
Mäntyharju 87-88	siHkMr	0.4	--	61	68	36	42
Piippola 86-87	HkMr	4.65	171	210	125	104	160
Piippola 87-88	HkMr	2.1	70	102	98	80	156
Urkala 86-87	Hk	0.1	3	12	11	--	10
Urkala 87-88	Hk	0.2	4	8	6	--	5
Alajärvi	Hk	5.2	128	180	95	53	130
Piippola	Hk	2.7	62	91	154	46	124
Joensuu p. 14	saSi	7.8	191	153	109	62	135
Joensuu p. 20	Hk	1.8	39	46	--	--	20
Joensuu p. 33	Hk	8.4	205	114	97	52	110
Joensuu p. 38	saSi	9.3	235	242	145	62	226
Keskipoikkeama, mm			24.8	17.1	26.8	41.8	



—	Mitattu	x	kaava 6.23 insitu SP	□	kaava 6.22
x	kaava 6.23 SPo, sa	△	kaava 6.23 SPo, lab		

Kuva 6.9. Lasketut ja mitatut routanousut eri tutkimuskohteissa

6.2 Tilastolliset menetelmät

Vähemmän vaativissa kohteissa tai alustavassa suunnittelussa voidaan vaativien ja kalliiden laboratoriokokeiden tilalla käyttää tilastollisia menetelmiä routivuuteen ja routanousuun liittyvien parametrien likimääräiseen arvioimiseen.

Kujala /1991/ esittää kaavojen 6.32, 6.33, 6.34 ja 6.35 mukaiset yhteydet routanousukokeessa määritetylle routanousunopeudelle, kokonaisroutanousulle, routanoususuhteelle ja segregatiopotentiaalille.

$$V_{24\ h} = 0.013 + 0.002 * w_{vol} + 0.785 * \alpha_{(T = -2.5^{\circ}C)} \quad (6.32)$$

$$\begin{aligned} h_{max} / H = & -0.013 + 0.003 * (\% < 0.02mm) \\ & + 0.003 W_{vol} + 0.622 * \alpha_{(T = -2.5^{\circ}C)} \end{aligned} \quad (6.33)$$

$$h_{max} = -0.018 + 0.184 * w_{vol} + 53.224 * \alpha_{(T = -2.5^{\circ}C)} \quad (6.34)$$

$$SP = 0.726 + 0.034 * w_{vol} + 24.091 * \alpha_{(T = -2.5^{\circ}C)} \quad (6.35)$$

V_{24h}	on	routanousunopeus 24 h aikana, mm/h
h_{max}		kokonaisroutanousu routanousukokeessa, mm
h_{max}/H		routanoususuhte, - (H on routivan maakerroksen paksuus routineena)
SP		segregatiopotentiaali, mm ² /Kh
w_{vol}		tilavuusvesipitoisuus, %
$\alpha_{(T=-2.5\ C)}$		jäätymättömän veden määrä -2.5 asteessa C.
(%<0.02 mm)		seulan 0.02mm läpäisyprosentti %

Taulukossa 6.10 on esitetty edellisten kaavojen mukaan lasketut routanousua kuvaavien tekijöiden arvot. Jäätymättömän veden määrä on arvioitu Kujalan /1991/ aineiston perusteella (Liite 11).

Taulukko 6.10. Kaavoilla 6.32 ja 6.34 lasketut routanousunopeudet ja maksimi routanousut routanousukokeessa.

Tutkimuskohde	w_{vol} lähtötieto	$\alpha_{(T=-2.5\text{ C})}$ liite 11	V_{24h} , kaava 6.32, mm/h	h_{max} , kaava 6.34, mm
Kontula	63.3	0.142	0.28	21.5
Nummi-Pusula	43.1	0.064	0.15	11.0
P-O pl 100+17	40.4	0.014	0.10	8.2
P-O pl 114+80	47.1	0.014	0.12	9.4
P-O pl 100+40	36.1	0.0145	0.097	7.4
Otaniemi	13.6	0.088	0.11	7.2
Jyväskylä	30.7	0.148	0.19	13.5
Oulunsuu	24.0	0.039	0.09	6.5
Kempele- Oulunsalo	45.5	0.014	0.11	9.1
Jämsä 86-88	41.7	0.075	0.155	11.6
Myrskylä 86-88	42.7	0.322	0.351	25.0
Mäntyharju 86- 88	18.7	0.044	0.085	5.8
Piippola 86-88	26.2	0.044	0.1	7.2
Urkala 86-88	8.6	0	0.03	1.6
Alajärvi	37.4	0.029	0.111	8.4
Piippola	27.4	0.049	0.106	7.6
Joensuu p. 14	37.0	0.165	0.216	15.6
Joensuu p. 20	22.3	0	0.058	4.1
Joensuu p. 33	22.9	0.148	0.175	12.1
Joensuu p. 38	45	0.165	0.233	17.0

Kaavalla 6.36 lasketut pohjamaan routanousut eri kohteissa on esitetty taulukossa 6.11.

$$\Delta h = \frac{h_{\max}}{H} * D' \quad (6.36)$$

Δh on	routanousu, mm
h_{\max}/H	routanoususuhde (kaava 6.33), -
D'	roudan tunkeutumissyvyys routivassa maakerroksessa, m

Chen /1989/ esittää kaavan 6.37 suhteellisen routanousun laskemiseksi. Kohteissa, joissa ei ole mitattu roudan syvyyttä, on roudan tunkeutumisvauhdiksi oletettu muista kohteista saatu keskimääräinen arvo, eli 0.9 cm /vrk. Pohjaveden oletetaan olevan metrin syvyydessä. Kohteittain saadut tulokset ovat taulukossa 6.11.

$$h_{\max} / H = 2.7 * 10^{-7} * w^{3.0203} * \rho_d^{5.38384} * V_f^{-1.2181} * H_w^{-0.2219} * I_p^{1.0892} \quad (6.37)$$

h_{\max}/H on	routanoususuhde, -
w	vesipitoisuus, p-%
ρ_d	kuivairtoteihs, g/cm ³
V_f	roudan tunkeutumisnopeus, cm/vrk
H_w	pohjaveden korkeusasema maanpinnalta, cm
I_p	plastisuusluku, %

Taulukko 6.11. Kaavoilla 6.33 ja 6.35 lasketut routanoususuhteet ja segregatiopotentialit sekä laboratoriossa määritetyt segregatiopotentialit ja mitatusta routan syvyydestä kaavalla 6.36 lasketut maksimi routanousut sekä kaavalla 6.37 lasketut routanoususuhteet ja havaitut routanoususuhteet.

Tutkimus- kohde	SP kaava 6.35 mm ² /Kh	SPo laboratorio mm ² /Kh	h_{\max}/H kaava 6.33 -	Δh kaava 6.36 mm	h_{\max}/H kaava 6.37 -	h_{\max}/H havaittu -
Kontula	6.7	1.5	0.58	238	1.98	0
Nummi-Pusula	3.7	4.5	0.36	180	0.32	0.13
P-O pl 100+17	2.4	1.81	0.38	144	0.50	-
P-O pl 114+80	2.7	1.61	0.38	277	1.20	-
P-O pl 100+40	2.3	0.36	0.12	94	-	-
Otaniemi	3.3	0.84	0.10	93	-	-
Jyväskylä	5.3	4.75	0.40	120	-	0.31
Oulunsuu	2.5	5.6	0.15	102	-	0.14
Kempele-Oulunsalo	2.6	9.6	0.36	216	0.75	0.12
Jämsä 86-87	4.0	1.5-3.0	0.26	224	0.21	0.094
Jämsä 87-88	4.0	1.5-3.0	0.26	119	0.40	0.162
Myrskylä 86-87	9.9	0.5-1.5	0.59	644	0.37	0.026
Myrskylä 87-88	9.9	0.5-1.5	0.59	375	0.60	0.044
Mäntyharju 86-87	2.4	2.5-3.5	0.12	206	0.01	0.029
Mäntyharju 87-88	2.4	2.5-3.5	0.12	--	--	--
Piippola 86-87	2.7	2.0-3.5	0.14	228	0.02	0.097
Piippola 87-88	2.7	2.0-3.5	0.14	159	0.04	0.135
Urkala 86-87	1.0	0-0.5	0.02	33	0	0.007
Urkala 87-88	1.0	0-0.5	0.02	19	0	0.006
Alajärvi	2.7	1.6-6.9	0.17	246	--	0.089
Piippola	2.8	7.1-9.2	0.17	234	--	0.093
Joensuu p. 14	6.0	3.7-7.9	0.42	336	--	0.169
Joensuu p. 20	1.5	--	0.05	46	--	0.024
Joensuu p. 33	5.1	0-12.6	0.37	186	--	0.22
Joensuu p. 38	6.2	6.0-11.0	0.49	413	--	0.266

Taulukossa 6.12 on esitetty routivuusluokitus kohteittain plastisuuskartan, hienoustekijän, segregatiopotentialin ja routanousunopeuden perusteella. Kohteina ovat Saarelaisen ja tämän tutkimuksen kohteet.

Taulukko 6.12. Routivuusluokitus lähteen /ISSMFE 1989/ mukaan.

Tutkimus- kohde	Plastisuus- kartta	Hienoustekijä Rf	SP ₀	Routanousu- nopeus
Kontula	liev. routiva	eritt. routiva	kesk. routiva	eritt. routiva
Nummi-Pusula	-	eritt. routiva	eritt. routiva	kesk. routiva
P-O pl 100+17	kesk. routiva	eritt. routiva	kesk. routiva	kesk. routiva
P-O pl 114+80	liev. routiva	eritt. routiva	kesk. routiva	kesk. routiva
P-O pl 100+40	-	liev. routiva	routimaton	kesk. routiva
Otaniemi	-	routimaton	liev. routiva	kesk. routiva
Jyväskylä	eritt. routiva	eritt. routiva	eritt. routiva	eritt. routiva
Oulunsuu	-	eritt. routiva	eritt. routiva	kesk. routiva
Kempele- Oulunsalo	kesk. routiva	eritt. routiva	eritt. routiva	kesk. routiva
Alajärvi	-	-	eritt. routiva	kesk. routiva
Piippola	-	-	eritt. routiva	kesk. routiva
Joensuu p. 14	-	-	eritt. routiva	eritt. routiva
Joensuu p. 20	-	-	-	liev. routiva
Joensuu p. 33	-	-	eritt. routiva	eritt. routiva
Joensuu p. 38	-	-	eritt. routiva	eritt. routiva

7. TULOSTEN TARKASTELU

CBR-kokeen ja vesipitoisuuden välinen vuorosuhde (liitteet 5-7)

Kontulan lihavalla savella (liite 5) havaitaan selvä CBR-luvun pieneneminen ($R^2=0.61$), kun vesipitoisuus kasvaa näytteessä. Nummi-Pusulan savisella siltillä selitysaste, $R^2=0.72$, oli vielä parempi. Sekä Kontulan että Palojärvi-Olkkalan pl 100+17:n kohteissa havaitaan, että kuvaajissa, joissa on kaikki näytteet huomioitu, on paremmat selitysasteet. Paras selitysaste, $R^2=0.92$, saatiin Otaniemen rakennetuilla hiekkamoreeni näytteillä. Tässä mielessä näytteiden rakentaminen onnistui hyvin. Huonoin selitysaste $R^2=0.07$ saatiin Palojärvi-Olkkalatien pl 100+40:n hiekalla. Tähän on syynä se, että näytteen valmisteleminen koetta varten oli vaikeaa. Koestuspintaa ei aina saatu mahdollisimman tasaiseksi johtuen hiekassa olleista ohuista juuririhmastoista.

Kuvaajassa, jossa on esitetty kaikki tutkitut näytteet havaitaan että selitysaste kuvaajalla, jossa ei ole huomioitu hiekkaa $R^2=0.72$, on parempi kuin kuvaajalla, joka ottaa huomioon kaikki näytteet $R^2=0.53$. Hiekan CBR-arvot ovat muiden maalajien arvoja selvästi korkeammat. CBR-kokeen käyttökelpoisuutta saattaa parantaa kenttä CBR-kokeen käyttöönotto.

Karkearakeisille materiaaleille optimivesipitoisuudessa tehty CBR-koe saattaa antaa poikkeuksellisen korkeita kantavuusarvoja (vrt. liite 7).

Kantavuusmoduulin määrittäminen eri menetelmillä

Mikäli verrataan tielaitoksen menetelmällä arvioituja /Tiel 1990/ ja levykuormituskokeilla määritettyjä kantavuusmoduuleja, havaitaan, että ainoastaan Kontulan ja Nummi-Pusulan kohteiden kentällä mitatut moduulit ovat arvioituja pienemmät. Muissa kohteissa mitatut kantavuudet olivat Palojärvi-Olkkala pl 114+80 kohdetta lukuunottamatta arvioituja selvästi suuremmat sekä keväällä että kesällä.

Vaikka kaavojen 5.3 ja 5.4 /Orama 1993/ on esitetty kuvaavan vuorosuhdetta sulamisvaiheessa määritetyn CBR-luvun ja levykuormituskokeella saadun kantavuusmoduulin välillä, voitaisiin kaavoilla, tehtyjen kokeiden perusteella, kuvata myös yhteyttä luonnontilaisten ja vesiupotuksessa olleiden näytteiden koetulosten ja keväällä tehtyjen levykuormituskokeiden (sekä STINA-, että tavallisen levykuormituskokeen) välillä. Kaavat 5.1 ja 5.2 /Shell 1978/ kuvaavat luonnontilaisten sulien näytteiden CBR-kokeiden

tulosten ja jaksollisen kolmiakσιαalikokeen tulosten välistä vuorosuhdetta. Kaavat soveltuvat kuvan 5.5 perusteella kuvaamaan hyvin myös keväällä tehtyjen pudotuspainolaittekokeiden tulosten sekä luonnontilaisten ja vesiupotuksessa olleiden näytteiden CBR-kokeiden tulosten välistä vuorosuhdetta. Tämä onkin ymmärrettävää, sillä pudotuspainolaite on luonteeltaan dynaaminen koestuslaite. Tällä hetkellä luotettavimpana kantavuuden määrittämismenetelmänä on pidettävä levykuormituskoetta, johon nykyinen suunnittelukäytäntökin perustuu. Käyttökustannuksiltaan ja kokeen toistettavuuden kannalta edullisin menetelmä on pudotuspainokoe, mutta sen käyttö tien mitoituksessa ja kevätkantavuuden määrittämisessä edellyttää vielä kehitystyötä. Nykyisellään pudotuspainolaitteen käyttö kevätkantavuuden mittaamisessa johtaa rakenteen alimitoitukseen.

Kevätkantavuuskerroin

Kevään kantavuuskatoon pohjamaassa vaikuttaa eniten maapohjan routivuus. Routivuuteen ja sen voimakkuuteen vaikuttavat lähinnä maalajin rakeisuus, vesipitoisuus ja maassa vallitseva jännitystilä. Kevätkantavuuskerrointa laskettaessa kantavuusmoduulin määrittämiseen käytetään yleensä levykuormitus- tai pudotuspainolaitteistoa. Yhden havaintokauden perusteella kaavalla 5.5 saadaan aina kevätkantavuuskertoimeksi säätökijöistä riippuvia arvoja. Säätökijöitä ovat mm. maapohjaan vaikuttava pakkasmäärä, routaantumis- ja sulamisnopeus sekä sademäärä. Nämä tekijät sekä kuivatusolosuhteet vaikuttavat pohjamaan vesipitoisuuteen ja pohjavedenpinnan korkeusasemaan. Näinollen kevätkantavuuskerroin tulisi määrittää useamman kuin yhden vuoden mittausten perusteella.

Kuva 5.6 esittää segregatiopotentialin ja n -eksponentin välistä vuorosuhdetta, kun kaavassa 5.11 on käytetty kokonaiskuormana vakioarvoa 40 kPa. Kuvan 5.7 murtoviivat kuvaavat vuorosuhdetta segregatiopotentialin ja eksponentin n välillä, kun kaavassa 5.11 käytetään kokonaiskuormana tutkimuskohteittain erikseen laskettua arvoa. Kokonaiskuorman vakioarvoa 40 kPa käyttäen saadaan kaavalla 5.10 kevätkantavuuskertoimen arvoja, jotka vastaavat paremmin levykuormituskokeen tulosten perusteella määritettyjä arvoja.

Maalajin routimisherkkyttä kuvaa hyvin segregatiopotentiali. Koska segregatiopotentialin määrittäminen on suhteellisen kallista ja vaativaa, pyritään segregatiopotentiali arvioimaan helpommin määritettävissä olevan hienoustekijän avulla. Jessbergerin et al /1989/ mukaan segregatiopotentialilla ja hienoustekijällä on kuvan 5.8 mukainen vuorosuhde. Tutkimusten Palolahti et al. /1993/ ja Saarelainen et Toivonen /1991/ sekä tämän tutkimuksen yhteydessä tehdyt laboratoriokokeet osoittavat samansuuntaista

vuorosuhdetta. Kuvassa 5.9 olevat koepisteet (Friberg et al. /1989/) osoittavat, että rakennetuilla näytteillä tulokset voivat erota kuvan 5.8 osoittamalta käyrältä. Koetulokset osoittavat pienempää segregatiopotentiaalin arvoa, vaikkakin kuvaajan muoto on samanlainen. Kuvassa 5.10 ei havaita samanlaista yhteyttä segregatiopotentiaalin ja hienoustekijän kanssa kuin kuvissa 5.8 ja 5.9. Tähän on ilmeisesti osasyynä erilainen koejärjestely ja laitteisto eri tutkimuslaitoksissa.

Kuvassa 5.13 voi nähdä kevätkantavuuskertoimen ja segregatiopotentiaalin välisen vuorosuhteen. Kuvaan on piirretty pienimmän neliösumman menetelmällä eksponenttinen kuvaaja. Todellisuudessa yhteys on kuitenkin lähempänä käsin piirrettyä käyrää, jolloin pienellä segregatiopotentiaalin arvolla kevätkantavuuskerroin lähenisi arvoa 0.8-1.0.

Roudan syvyys (taulukko 6.4)

Stefanin yhtälöllä 6.1 lasketuilla k-kertoimilla (taulukko 6.1) ei havaita selvää riippuvuutta maalajista. Tätä kertoo myös se, että maan lämmönjohtavuutta kuvaavissa lausekkeissa, esimerkiksi Kerstenin yhtälöissä, ei ole rakeisuuteen liittyviä termejä.

Stefanin ja muunnetulla Berggrenin yhtälöllä roudan syvyyksiä laskettaessa rakennekerroksen ja pohjamaan ominaisuuksista laskettiin painotetut keskiarvot, joita käytettiin lähtöarvoina. Maapohjan kerroksellisuuden huomioonottaminen (kaava 6.21) ei antanut todellista roudan syvyyttä lähempiä tuloksia, koska kaikista tutkimuskohteista ei ollut saatavissa tarvittavia parametreja, kuten rakennekerroksen vesipitoisuus ja tilavuuspaino. Paras vastaavuus roudan syvyyttä laskettaessa saatiin Stefanin yhtälöllä, kun tutkimuskohteiden maalajien k-kerroin valittiin Oraman /1993/ havaintojen perusteella.

Routanousu (taulukko 6.9)

Segregatiopotentiaali on kaavan 6.27 mukaisesti riippuvainen kokonaiskuormituksesta. Jessbergerin /1989/ mukaan kaavassa oleva a-kerroin olisi kuvan 6.8 mukaisessa vuorosuhteessa savipitoisuuden kanssa. Tutkimusten Palolahti et al. /1993/, Friberg et al. /1989/ ja Saarelainen /1992/ yhteydessä tehtyjen routanousukokeiden tulosten mukaan (kuva 6.8) vuorosuhde ei ole niin yksiselitteinen. Tulosten mukaiset a-kertoimet ovat selvästi suurempia, kuin Jessbergerin /1989/ havaitsemat.

Kaavan 6.22 /Saarelainen 1992/ mukaan homogeenisen maan routanousu voidaan arvioida segregatiopotentiaalin, pakkasmäärän ja k-kertoimen avulla (kaava 6.22). Tällä kaavalla lasketut routanousut vastasivat toiseksi parhaiten mitattuja arvoja. Kerroksellisen maan menetelmä routanousun laskemiseksi (kaava 6.23) kuvasi todellista tilannetta parhaiten silloin, kun segregatiopotentiaaleina käytettiin in situ arvoja. Eniten tulokset

erosivat mitatuista, kun segregatiopotentialaaleina käytettiin arvoja, jotka saatiin käyttäen a-kertoimina laboratoriokokeiden avulla määritettyjä arvoja. Näin lasketut routanousut olivat kolmessa kohteessa samat tai hieman suurempia ja lopuissa kohteissa selvästi mitattuja pienempiä. Jessbergerin /1989/ tekemien havaintojen mukaan kohtisuoran jännityksen vaikutus segregatiopotentialiin arvoon on pienempi kuin tutkimuksissa /Friberg et al. 1989, Palolahti et al. 1993 ja Saarelainen 1992/. Jokaisella menetelmällä esiintyi joitain suuria poikkeamia mitattuihin arvoihin verrattuna. Syitä poikkeamiin oli esimerkiksi vajavaiset tiedot pohjaveden sijainnista.

Tilastolliset menetelmät

Tilastollisten menetelmien tulokset poikkeavat merkittävästi muilla menetelmillä saaduista tuloksista ja havainnoista. Mikäli tilastollisia menetelmiä halutaan käyttää luotettavammin tulisi aineiston olla kattavampaa kuin tässä käytetty. Esimerkiksi Oulunsalon ja Kempele-Oulunsuun kohteissa maalajia edustavat parametrit oli valittava 2-3 koetuloksen perusteella.

Kujalan /1991/ tulosten perusteella (kaava 6.33) laskettu routanoususuhde oli noin nelinkertainen havaittuun. Chenin /1988/ tulosten perusteella (kaava 6.37) laskettu routanoususuhde oli 6 kohteessa noin seitsenkertainen ja kolmessa kohteessa noin kolmasosa verrattuna havaittuun routanoususuhteeseen.

Kujalan maksimiroutanoususuhteen (kaava 6.36) avulla lasketut routanousut olivat noin 4 kertaisia havaintoihin verrattuna. Ero johtunee laboratoriokoemenettelystä, joka korostanee liiaksi hienorakeisten maalajien routivuuden voimakkuutta.

Taulukon 6.13 routivuusluokituksen tulokset vaihtelevat paljon. Routanousunopeus on laskettu Kujalan /1991/ aineiston perusteella.

Mikäli tilastollisia menetelmiä halutaan käyttää, tulee ne kalibroida käyttöolosuhteissa.

Tutkimustarve

CBR-kokeen (ϕ 150mm, h 125 mm) ja jaksollisen kolmiakσιαalikokeen (ϕ 150mm, h 350 mm) vaatiman häiriintymättömän näytteen otto on nykyisellään hankalaa ja kallista. Näytteenottoa tulisi kehittää siten, ettei se vaatisi koekuoppaa. Eräs ratkaisu tähän on kenttä CBR-kokeen käyttö. Pehmeiden maalajien kantavuuden määrittämisessä on kenttä

CBR-laitteistolla saatu lupaavia tuloksia /Arm 1991/.

Routanousukokeen tuloksissa on havaittu huomattavia poikkeamia eri laitosten ja lähteiden ilmoittamien koetulosten välillä. Poikkeamat johtuvat koejärjestelyissä ja näytteen käsittelyssä olevista eroista. Koe tulisikin standardoida edellämainittujen seikkojen osalta, jotta maa-aineksen routivuutta kuvaava segregatiopotentiaali olisi vertailukelpoinen eri laitosten tekemien kokeiden välillä. Lisäksi kokeessa vallitsevien olosuhteiden tulisivat vastata mahdollisimman hyvin kenttäolosuhteita, joita yleensä pyritään mallintamaan.

Kevätkantavuuden arviointiin kehitetty, maapohjassa vallitsevaan jännitystilaan perustuva, laskentamalli vaatii vielä tarkentavaa jatkotutkimusta. Ongelmina ovat edelleen mm. parametrien riippuvuus maan ominaisuuksista, maassa vallitsevan todellisen jännitystilan ja huokospaineen arviointi.

Routanousukokeeseen liittyvä a -kerroin vaikuttaa tulokseen ratkaisevasti routanousua laskettaessa. Tässä tutkimuksessa on ilmennyt erittäin suurta vaihtelevuutta verrattaessa kotimaisten tutkimusten routanousukokeiden perusteella määritettyä a -kerrointa Jessbergerin /1989/ vastaaviin havaintoihin. Syyt poikkeamiin tulisi selvittää.

8. YHTEENVETO

Tutkimus tehtiin tielaitoksen tilauksesta. Siinä käytettiin hyväksi edellisissä tutkimuksissa (STINA 1977, Jämsä 1985 ja Palolahti et al. 1993) saatuja tuloksia. Lisäksi valittiin näissä tutkimuksissa olleista kohteista kuusi jatkotutkimuskohdetta, joista otettiin maanäytteitä luokitus-, CBR- ja routanousukokeita varten. CBR-kokeita tehtiin luonnontilaisille ja vesiupotuksessa 4 vuorokautta olleille näytteille. Routanousukokeet tehtiin VTT:llä niiden neljän tutkimuskohteen maanäytteille, joista ei ollut aikaisempia tutkimustuloksia käytettävissä.

Tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella pohjamaan kevätkantavuusmoduulin määrittystä ja siihen vaikuttavia tekijöitä, testata edellisessä tutkimuksessa kehitettyä jännitystilaan perustuvan mallin toimivuutta kevätkantavuuskertoimen määrittämiseksi sekä tarkentaa mallin parametrien määrittystä. Lisäksi tavoitteena oli CBR-kokeen käyttömahdollisuuksien tutkiminen sekä roudan syvyyden ja routanousun arviointiin käytettyjen menetelmien kelpoisuuden tarkastelu.

CBR-kokeiden tulosten ja vesipitoisuuksien välisen vuorosuhteen selitysasteet olivat hienorakeisilla maalajeilla ja hiekkamoreenilla parempia kuin hiekalla. Hiekalla CBR-luvut olivat selvästi korkeampia kuin muilla näytteillä, joten vuorosuhde näyttää riippuvan myös maalajista. Karkearakeisilla materiaaleille optimivesipitoisuudessa tehty CBR-koe saattaa antaa poikkeuksellisen korkeita kantavuusarvoja (vrt. liite 5).

Dynaaminen kantavuusmoduuli arvioitiin kaavojen 3 ja 4 avulla luonnollisten ja vesiupotuksessa säilytettyjen näytteiden CBR-kokeen tuloksen perusteella kohtalaisella tarkkuudella. Vastaavasti staattinen kantavuusmoduuli arvioitiin kaavojen 5 ja 6 avulla, mutta tarkkuus ei ollut aivan yhtä hyvä. CBR-kokeen käyttökelpoisuutta saattaa parantaa kenttä CBR-kokeen käyttöönotto.

Tielaitoksen tierakenteen parantamisohjeluonnoksessa ehdotetaan tien pinnalta mitattu kantavuus kerrottavaksi kevätkantavuuskertoimella, jonka suuruus on sorateilla 0,4...0,8, AB-teillä 0,8...1,0 ja kevyesti parannettavilla päällystetyillä teillä 0,6...0,8. Kun pohjamaan kevätkantavuuskerroin lasketaan mitatuista levykuormituskokeen tuloksista, niin laskentatulokset vaihtelevat mittausajankohtien ja sääolosuhteiden mukaan. Luotettavampaan tulokseen päästäisiin, jos saatavilla olisi useamman vuoden aikana mitattuja tuloksia. Lisäksi aikaisempien tutkimusten ja tämän tutkimuksen tuloksien perusteella kevätkantavuuskerroin voidaan likimääräisesti arvioida myös maapohjassa vallitsevaan jännitystilaan perustuvan mallin avulla. Mallin toimivuutta eri olosuhteissa tulisi kuitenkin vielä tutkia. On huomattava, että sorateiden ja yleensä ohutrakenteisten tierakenteiden kantavuus riippuu lähes yksinomaan pohjamaan kantavuudesta.

Roudan syvyys ja routanousu saadaan arvioitua maan lämpötekniisiin ominaisuuksiin ja pakkasmäärään perustuvilla menetelmillä. Roudan syvyys saatiin arvioitua parhaiten Stefanin yhtälön avulla. Routanousu arvioitiin parhaiten maan kerroksellisuuden huomioivalla laskentatavalla in situ segregaatiopotentiaaleja käyttäen, joskin tulokset poikkesivat mitatuista.

Tilastollisia menetelmiä pyritään käyttämään alustavassa ja vähemmän tarkkuutta vaativassa suunnittelussa routanousuun liittyvien parametrien likimääräiseen arvioimiseen. Tilastollisilla menetelmillä tehdyt routasuureiden arvioinnit antoivat ristiriitaisia tuloksia. Tilastolliset menetelmät tulisi kalibroida käyttöolosuhteissa.

Kirjallisuus

Andersland, O., & Anderson, D. 1978. Geotechnical engineering for cold regions. U.S.A. 566 s.

Arm, M., 1991. Finkorniga jordmaterials egenskaper. Linköping, Statens väg- och trafikinstitut, Notat nr V 147.41 s.

Chamberlain, E. J., 1981. A statistical evaluation of soil and climatic parameters affecting the change in pavement deflection during thawing of subgrades. Hanover N.H., U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL, report 81-15. 10 s.

Chamberlain, E. J., 1987. A freeze-thaw test to determine the frost susceptibility of soils. Hanover N.H., U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL, report 87-1. 90 s.

Chen, X., 1989. Current development on frost susceptibility prediction of soils in P.R. China. In: VTT Symposium 95, Saariselkä 13-15.3.1989, Frost in geotechnical engineering, Espoo, vol 2. s. 481-490.

Culley, R.W., 1967. Frost penetration in Saskatchewan pavements. Saskatchewan department of highways technical report 6.

Friberg, P. & Slunga, E., 1989. Maalajien routivuuskriteerien kehittäminen. Diplomityö. Otaniemi, Teknillinen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos, Pohjarakennus ja maamekaniikka. 130 s. + 12 liit.

Gustavsson, H., 1991. Roudan sulamisen vaikutus maakerroksen kevätkantavuuteen. Diplomityö. Otaniemi, Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, Pohjarakennus ja maamekaniikka. 84 s.

Helander, R., 1985. Maan terminen analyysi elementtimenetelmällä. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, rakennusinsinööriosasto, Otaniemi. 68 s.

ISSMFE Technical Committee on frost, TC8, 1989. Work report 1985-1989. In: VTT Symposium 94, Saariselkä 13-15.3.1989, Frost in geotechnical engineering, Espoo, vol 1. s. 15-47.

ISSMFE Technical Committee on frost, TC8, 1993. Work report 1990-1993. Recommended tests for predicting the thaw weakening of subgrade soil. In: Proc. 2nd International Symposium, (toim.) Phukan, A., Frost in geotechnical engineering, 28.6.-1.7.1993, Anchorage, Alaska, U.S.A. s. 159-172.

Jessberger, H., 1974. Vergleichende Beurteilung der gebräuchlichen Frostkriterien für Frostschutz-Kies-Sande anhand der Originalveröffentlichungen. Bochum. 242 s.

Jessberger, H.L., & Jagow, R., 1989. Determination of frost susceptibility of soils. VTT Symposium 95, Frost in geotechnical engineering, Saariselkä, 13-15.3.1989, Vol 2. s. 449-470.

Jämsä, H., 1985. Pohjamaan kantavuus tierakenteen alla, Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tie- ja liikennelaboratorio, Tiedotteita 526. 33 s.

Knutsson et al. 1985. Analysis of large scale laboratory in situ frost heave tests. 4th Int. Symp. on Ground Freezing. Sapporo. s. 65-70.

Konrad, J-M., 1980. Frost heave mechanics. Ph.D.Thesis. University of Alberta. 472 s.

Konrad, J-M., 1990. Segregation potential-pressure-salinity relationships near thermal steady state for a clayey silt. In: Can. Geotech. J., Vol 27. s. 203-215.

Konrad, J-M., & Morgenstern, N.R., 1980. A mechanistic theory of ice lense formation in fine-grained soils. In: Can. Geotech. J., Vol 17, s. 473-486.

Konrad, J-M., & Morgenstern, N.R., 1981. The segregation potential of a freezing soil. In: Can. Geotech. J., Vol 18, s. 482-491.

Konrad, J-M., & Morgenstern, N.R., 1982. Prediction of frost heave in the laboratory during transient freezing. In: Can. Geotech. J., Vol 19, s. 250-259.

Kujala, K., 1991. Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils. Oulu, Acta Universitatis Ouluensis, series C, technica 58. 99 s.

Liimatta, L., et al. 1989. Pudotuspainolaitteen käyttö tien rakenteellisen toiminnan arvioinnissa ja parantamistarpeen suunnittelussa. Oulu, Oulun Yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion julkaisuja 2. 85 s.

McCormick, G., 1993. Frost penetration beneath cleared pavements. In: Proc. 2nd International Symposium, (toim.) Phukan, A., Frost in geotechnical engineering, 28.6.-1.7.1993, Anchorage, Alaska, U.S.A. s. 117-126.

Miller, R.D., 1972. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils. Highway research record 393. s.1-11.

Morgenstern, N. R. & Nixon, J. F., 1971. One-dimensional consolidation of thawing soils. In: Can. Geotech. J., Vol 8, No 4, 558-565 s.

Mäkelä, H., & Tammirinne, M., 1979. Rakennusten perustusten routasuojausohje. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Geotekniikan laboratorio, Tiedonanto 37. 53 s.

Nixon, J., 1982. Field frost heave predictions using the segregation potential concept. Can. Geotech. J., Vol 19. s. 526-529.

Orama, R., 1982. Tielaitos, Geopalvelukeskus, luentomoniste, julkaisematon.

Orama, R., 1993. Tielaitos, Geokeskus. Henkilökohtainen tiedonanto.

Palolahti, A., Slunga, E., Saarelainen, S., & Orama, R., 1993. Sulavan maan kantavuus. Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, Pohjarakennus ja maamekaniikka, julkaisu 1. 99 s.

Palolahti, A., 1994. Tutkimusmenetelmät, liitteet In: Hentilä, V., Slunga, E., Palolahti, A. Roudan vaikutusten mallintaminen, Tielaitos, Tielaitoksen selvityksiä 8/1994, Helsinki 1994. s 15-21, liite 6.

Parantainen. J., 1982. Tien rakenteellinen suunnittelu. Teknillinen korkeakoulu, Tietekniikka, Espoo, T22. 153 s.

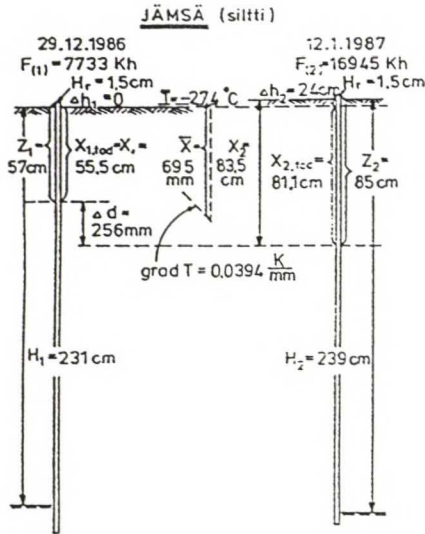
Phukan, A. 1985. Frozen ground engineering. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 336 s.

Rieke et al. 1983. The role of specific surface area and related index properties in the frost heave susceptibility of soils. 4th Int.Conf.of PF. s. 1066-1071.

Saarelainen, S., 1990. Tien alusrakenteen kevät kantavuuden mallintaminen. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Geotekniikan laboratorio, luonnos.

- Saarelainen, S., & Toivonen, T., 1991. Valtatien 3 routamitoitus routanousun mukaan välillä Riihimäki P-Virala. Rakennustekniikka 1/1991. s. 13-18.
- Saarelainen, S., 1992. Modelling frost heaving and frost penetration in soils at some observation sites in Finland. The SSR model. Espoo, Technical Research Centre of Finland, Publications 95. 120 s.
- Shell 1978. Shell Pavement Design Manual. London.
- SNV 670 320a. 1973. CBR-Versuche im Laboratorium. Schweizerische Normenvereinigung (SNV). 10 s.
- SNV 670 316. 1975. CBR-Penetrometer, Feldversuch. 3.
- Stefan, J., 1890. Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeere, vol XCVIII, no IIa. Wien. s. 965-983.
- STINA 1977:3. Samarbetsprojekt för tillämping i Norden av AASHO-undersökning. Slutrapport, teknisk del. Oslo, Nordiska ministerrådets sekretariat. 203 s.
- Talonrakennuksen routasuojausohjeet, 1987. Rakentajain kustannus Oy, Helsinki. 95 s.
- Tiel, 1990. Laadunvalvontaohjeet, Alusrakenne ja päällysrakenteen sitomaattomat kerrokset. Tielaitos, Tiehallitus, Geopalvelukeskus, TIEL 732816. 76 s.
- Tholén, O., 1980. Falling weight deflectometer - A device for bearing capacity measurement: properties and performance. Stockholm, Sweden. Department of Highway Engineering, Royal Institute of Technology, Bulletin 1980:1. 113 s.
- TP BF-StB B7.1. 1988. CBR Versuch. Forschungsgesellschaft für Strassen und Verkehrswesen-Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau". 6 s.
- TVH 1985. Teiden suunnittelu, kansio B, TVL:n ohjeet, osa IV. Helsinki, Tie- ja vesirakennushallitus, Tiensuunnittelutoimisto.
- Williams, P.J., 1967. Properties and behaviour of freezing soils. Norges geotekniske institutt. Publication Nr. 72. Oslo. 119 s.

Liite 1. Segregaatiopotentiaalin määrittäminen in situ havainnoista
/Friberg et. al 1989/.



Mitatut lähtöarvot

- roudan syvyys Z_1, Z_2
 - routaputken pään korkeus maanpinnasta H_r
 - pakkasmäärä $F_{(1)}, F_{(2)}$
 - routanousu $\Delta h_1, \Delta h_2$
 - pohjavedenpinnan syvyys maanpinnasta H_1, H_2
- $Z_1 = 57 \text{ cm}$ $Z_2 = 85 \text{ cm}$
 $H_r = 1.5 \text{ cm}$
 $F_{(1)} = 7733 \text{ Kh}$, $F_{(2)} = 16945 \text{ Kh}$
 $\Delta h_1 = 0 \text{ mm}$, $\Delta h_2 = 24 \text{ mm}$
 $H_1 = 231 \text{ cm}$, $H_2 = 239 \text{ cm}$

Määritetyt lähtöarvot

- tilavuuspaino γ
- vesipitoisuus w
- kyllästysaste S_r
- huokoisuus n
- jäätyneessä maassa sulana pysyvän veden määrä w_u

$\gamma = 18.9 \text{ kN/m}^3$; taulukko 3
 $w = 28.4 \%$; taulukko 3
 $S_r = 95.4 \%$; taulukko 3
 $n = 44.4 \%$; taulukko 3
 $w_u = 0.05$; kuva 73
 $\gamma_w = 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Lasketaan:

- todellinen roudan syvyys alkuperäisessä (X_{1,100} = Z₁ - H_r - Δh₁ = 57cm - 1.5cm - 0 = 55.5cm maaprofiilissa (vertaa kuva 52):

$$\begin{cases} X_{1,100} = Z_1 - H_r - \Delta h_1 = 57 \text{ cm} - 1.5 \text{ cm} - 0 = 55.5 \text{ cm} \\ X_{2,100} = Z_2 - H_r - \Delta h_2 = 85 \text{ cm} - 1.5 \text{ cm} - 2.4 \text{ cm} = 81.1 \text{ cm} \end{cases}$$
- aika Δt : Δt on 29.12.1986 - 12.1.1987 ⇒ Δt = 336 h
- ajassa Δt jäätyneen maakerroksen alkuperäinen paksuus on Δd : Δd = X_{1,100} - X_{2,100} = 81.1mm - 55.5mm = 256 mm
- maanpinnan keskimääräinen lämpötila aikavälillä Δt on \bar{T} :
$$-\bar{T} = \frac{F_{(2)} - F_{(1)}}{\Delta t} = \frac{16945 \text{ Kh} - 7733 \text{ Kh}}{336 \text{ h}} \Rightarrow \bar{T} = -27.4^\circ \text{C}$$
- keskimääräinen jäätyneen maakerroksen paksuus on \bar{X} :
$$\bar{X} = \frac{Z_1 + Z_2}{2} - H_r = \frac{570 \text{ mm} + 850 \text{ mm}}{2} - 15 \text{ mm} \Rightarrow \bar{X} = 69.5 \text{ mm}$$
- keskimääräinen lämpötilagradientti jäätyneessä kerroksessa aikavälillä Δt on grad T :
$$\text{grad } T = \left| \frac{\bar{T}}{\bar{X}} \right| = \left| \frac{-27.4^\circ \text{C}}{69.5 \text{ mm}} \right| \Rightarrow \text{grad } T = 0.0394 \frac{\text{K}}{\text{mm}}$$
- kaava (33) ⇒ Δh₁ = 0.09 · 0.444 · 0.954 · $\frac{28.4 - 100 \cdot 0.05}{28.4}$ · 256 mm = 8.04 mm
- kaava (34) ⇒ v = $\frac{1}{1.05} \cdot \frac{24 \text{ mm} - 8.04 \text{ mm}}{336 \text{ h}} = 0.0475 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$
- kaava (32) ⇒ SP = $\frac{n}{0.0394 \frac{\text{K}}{\text{mm}}} = 1.2056 \frac{\text{mm}}{\text{h}} \cdot \frac{\text{mm}}{\text{K}} \Rightarrow \text{SP} = 1.2 \frac{\text{mm}^2}{\text{Kh}}$

Lasketaan kuormitus:

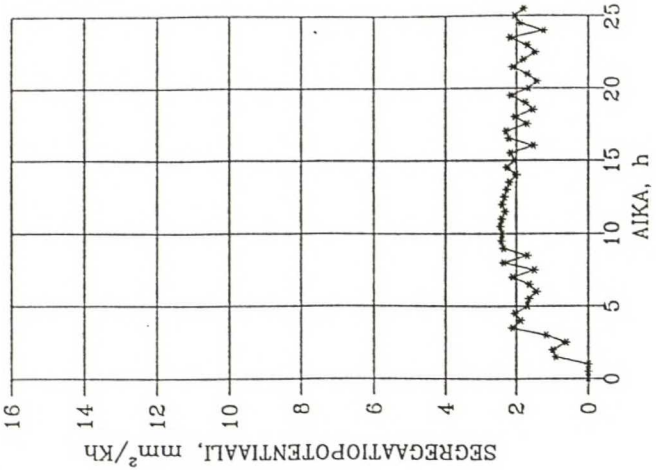
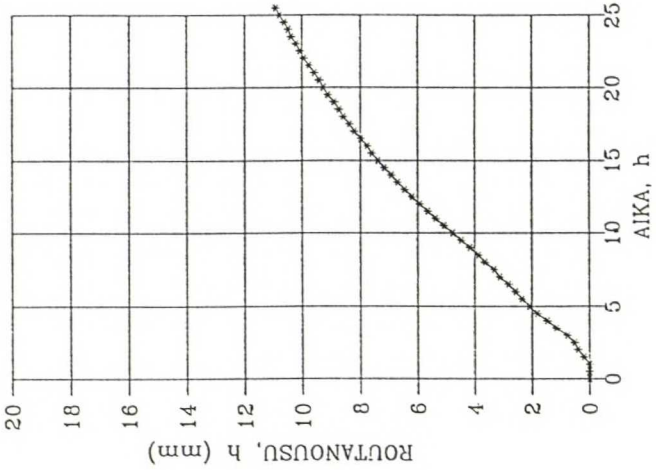
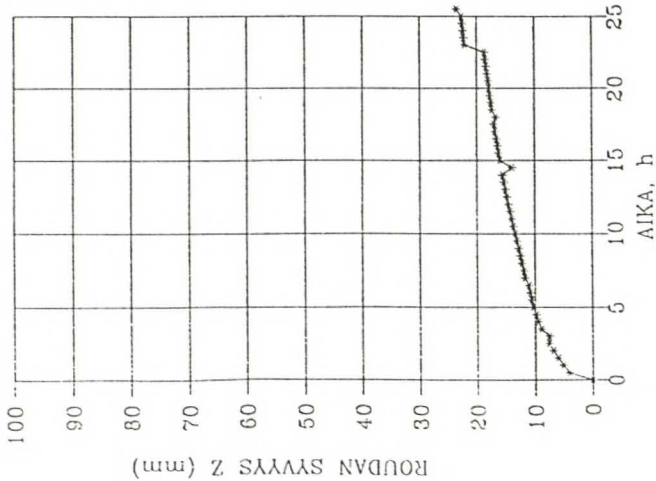
- pintakuorma q_p
- jäätyneen maan osuus : $\bar{X}_{100} \cdot \gamma = \frac{X_{1,100} + X_{2,100}}{2} \cdot \gamma = \frac{0.555 \text{ m} + 0.811 \text{ m}}{2} \cdot 18.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 12.91 \text{ kPa}$
- lisäveden osuus : $v \cdot \Delta t \cdot \gamma_w = 0.0475 \frac{\text{mm}}{\text{h}} \cdot 336 \text{ h} \cdot 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 0.16 \text{ kPa}$

$$\Rightarrow q_p = \bar{X}_{100} \cdot \gamma + v \cdot \Delta t \cdot \gamma_w = 12.91 \text{ kPa} + 0.16 \text{ kPa} = 13.07 \text{ kPa} \Rightarrow \underline{q_p = 13.1 \text{ kPa}}$$
- imusta aiheutuva lisäkuorma q_i
- roudan syvyys maanpinnasta : $\begin{cases} X_1 = Z_1 - H_r = 57 \text{ cm} - 1.5 \text{ cm} = 55.5 \text{ cm} \\ X_2 = Z_2 - H_r = 85 \text{ cm} - 1.5 \text{ cm} = 83.5 \text{ cm} \end{cases}$
- kaava (35) ⇒ $q_i = (2.31 \text{ m} - 0.555 \text{ m}) \cdot 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} + (2.39 \text{ m} - 0.835 \text{ m}) \cdot 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \Rightarrow \underline{q_i = 33.1 \text{ kPa}}$
- kokonaiskuorma q

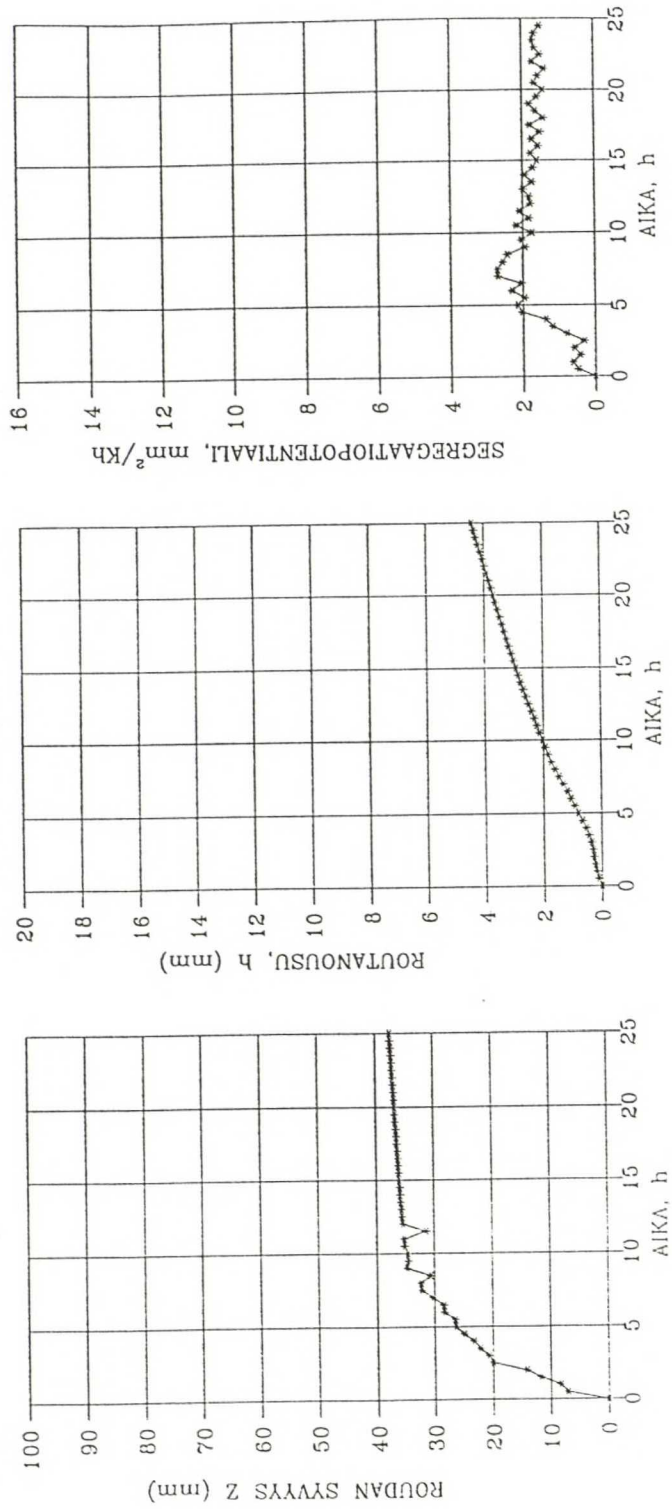
$$\text{kaava (36)} \Rightarrow q = 13.1 \text{ kPa} + 33.1 \text{ kPa} \Rightarrow \underline{q = 46.2 \text{ kPa}}$$

Liite 2. Routanouskokeiden tulostukset.

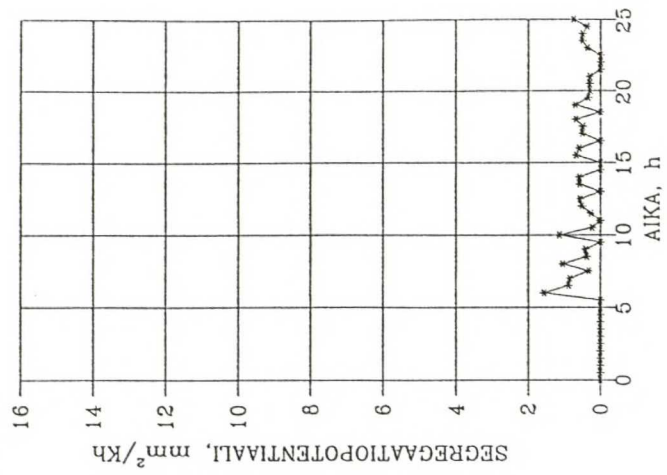
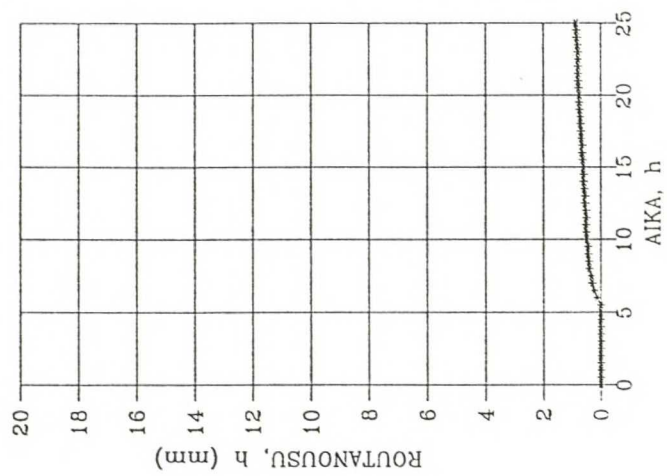
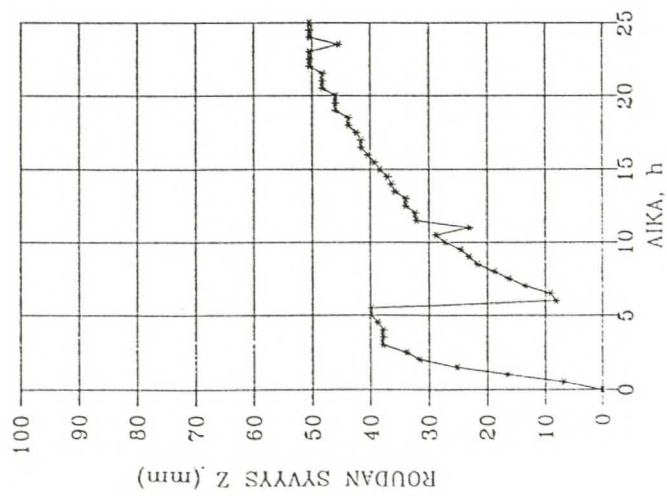
ROUTANOUSKOE
LaSa, NO. 1a
LAB.NO. 7292
KUORMITUS 3 kPa



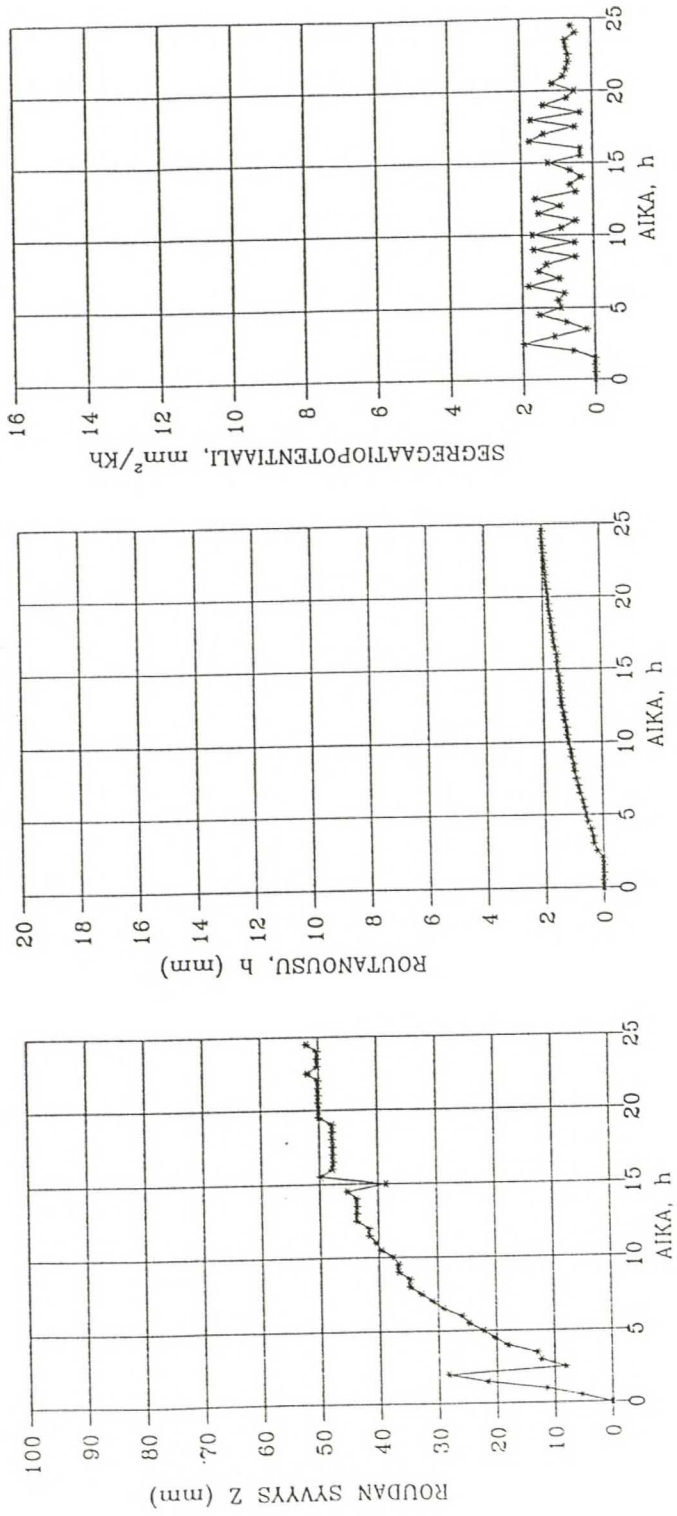
ROUTANOUSUKOE
 LaSa, NO. 2a
 LAB.NO. 7289
 KUORMITUS 3 kPa



ROUTANOUSUKOE
SiHk, NO. 3a
LAB.NO. 7291
KUORMITUS 3 kPa



ROUTANOUSUKOE
HkMr, NO. 4
LAB.NO. 7293
KUORMITUS 3 kPa

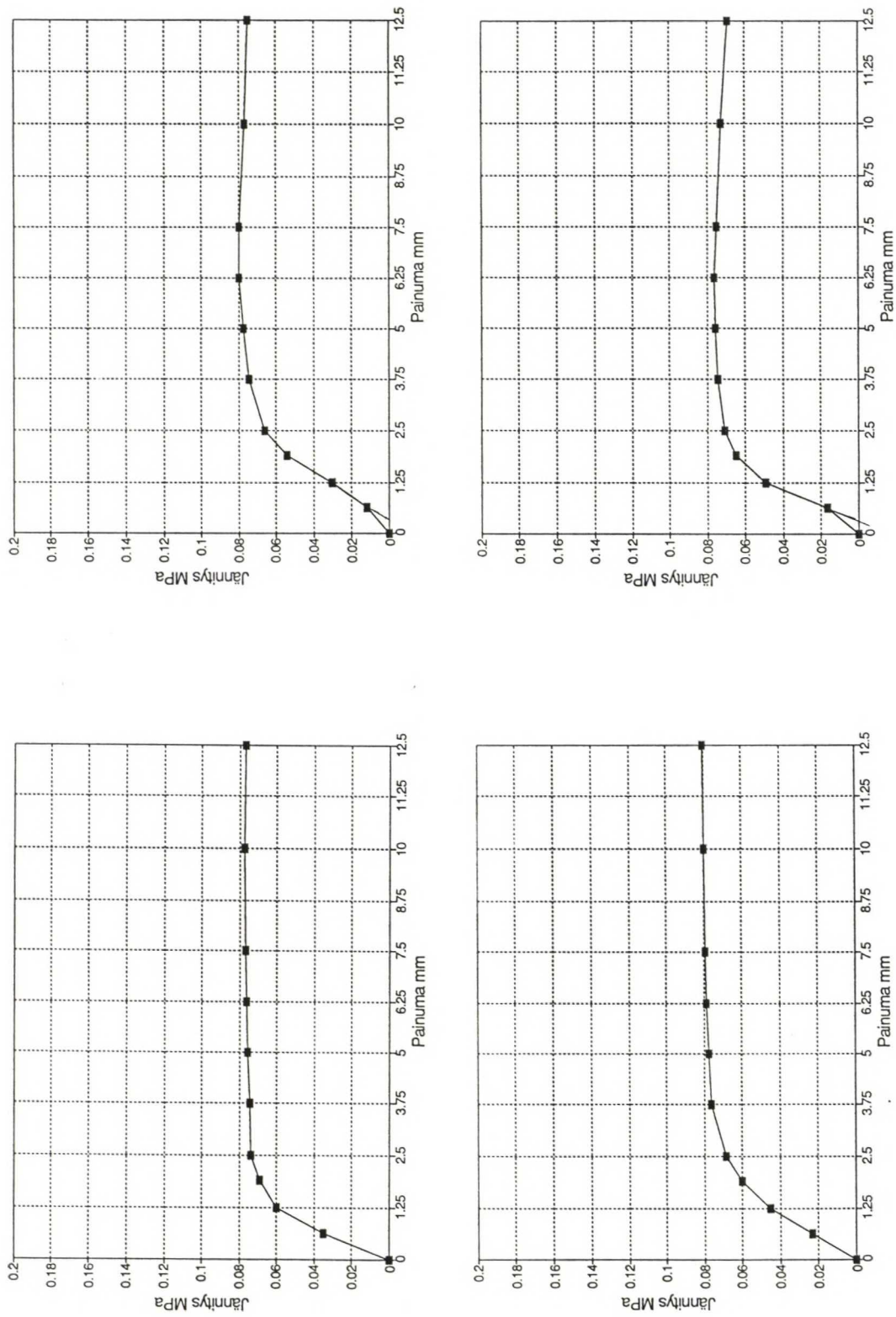


Liite 3. Laboratorio- ja CBR-kokeiden tulokset.

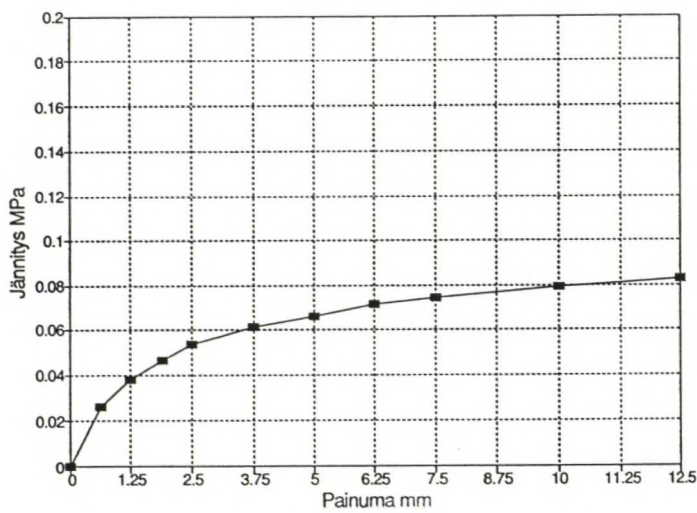
	Kontula	Nummi- Pusula *4	P-O pl 100+17	P-O pl 114+80	P-O pl 100+40	Otaniemi
Syvyys , m	0,75	1,0-1,2	0,9	0,7	0,8	0,6
Maalaji	liSa	saSi	laSa , kk	laSa	siHk	HkMr
savipitoisuus %	81,5	15	37	47	0,6	0,4
# < 0.02 mm %	93	70	88	80	3,8	7
# < 0.074 mm %	98,2	99,6	99,8	98,6	50,9	30
humus %	0,55	0,83	0	1,34	0,5	0,5
luonnontilainen w %	99,4	28,0-31,1	23,8	33,2	21,5	8,9
Wvol	75,8	41,3-44,8	40,4	47,1	36,1	13,6
irtotiheys t/m3	1,52	1,89	2,1	1,89	2,04	1,66
kuivairtotiheys t/m3	0,76	1,48	1,7	1,42	1,68	1,52
kiintotiheys t/m3	2,78	2,68	2,73	2,73	2,68	2,68
huokoisuus n %	73	45	37,9	48	37,4	43,1
huokosluku e	2,65	0,82	0,6	0,92	0,6	0,76
Kyllästysaste Sr %	1	0,92	1	0,98	0,97	0,31
WI %	82,8	29,5-33,4	36,9	58,5	20 *6	19,5 *6
Wp %	30,5	25,0-22,0	23,3	27,6	---	---
Ip %	52,3	4,5-11,4	13,6	30,9	---	---
IL	1,3	0,7	0,03	0,18	---	---
Kartiokokeen hie- nousluku F %	84,2	31,1-37,3	39,5	61,5	26,4-28,4*5	25,3 *6
Kapill.nousukork. cm	---	---	---	---	95	195
Hienoustekijä Rf %	96,7	50,7-44,7	100	80	3 *6	2,05 *6
SPo , mm2/Kh	1,5	4,5	1,81	1,61	0,36	0,84
CBR-kokeet :						
CBR % / w %						
luonnontilainen	1,1/88,7	3,3/28,7	22,5/20,3	3,4/35,7	31,6/23,0	10,4/10,1
	1,01/98,2	3,2/29,3		4,1/33,1	22,6/23,1	8,8/10,2
	1,01/94,4			4,2/30,2	23,0/22,1	
	1,06/98,3					
	0,79/77,1*1					
vesiupotus	0,73/100,8	1,9/30,3	2,3/30,0	4,3/34,5	19,1/22,8	5,2/15,1
	0,81/97,6	2,3/30,3	3,8/27,0	3,9/33,7	22,5/23,8	5,1/15,8
		2,8/28,7*2	2,7/26,1	4,5/30,9	17,9/23,8	6,4/14,9
syv 0.5 ositt. kuivak.	1,1/43,5					
	1,2/45,7					
	1,2/46,9					
	2,2/18*3					
*1: näytteen kork 150mm						
*2: syvyys 1,2m						
*3: koestettu edellisen näytteen kuivakuoripuoli						
*4: syvyys 1.0m / 1.2m , jos yksi arvo, niin syvyys 1.0m						
*5: # < 0.074 - # < 0.5						
*6: # < 0.074						

Liite 4. CBR-kokeiden kuvaajat.

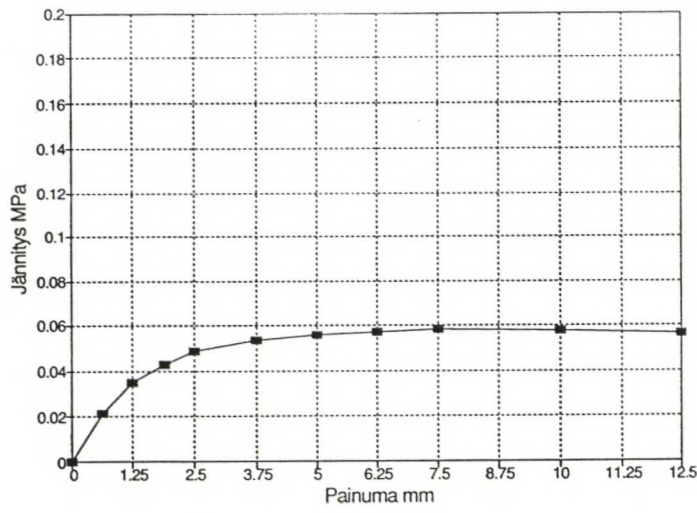
Kontula, luonnontilainen



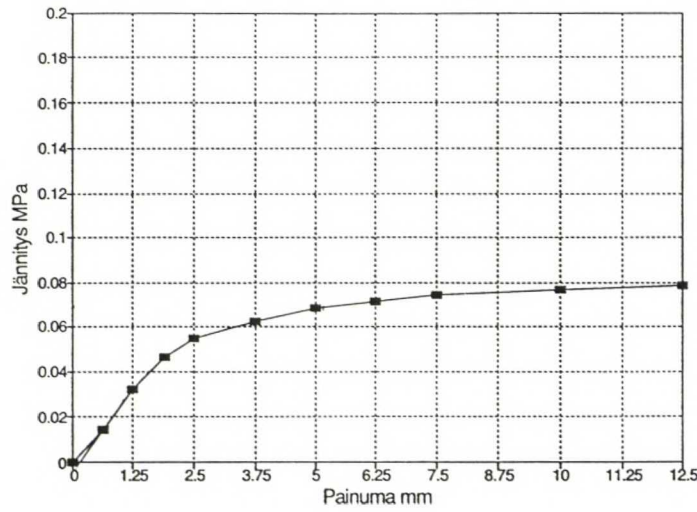
Kontula, luonnontilainen



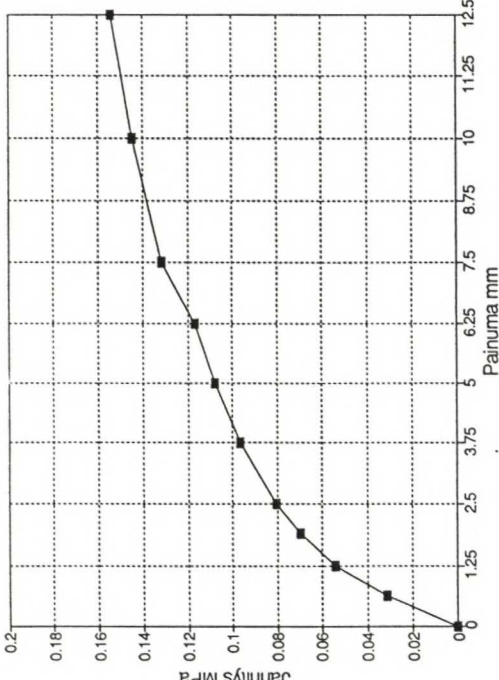
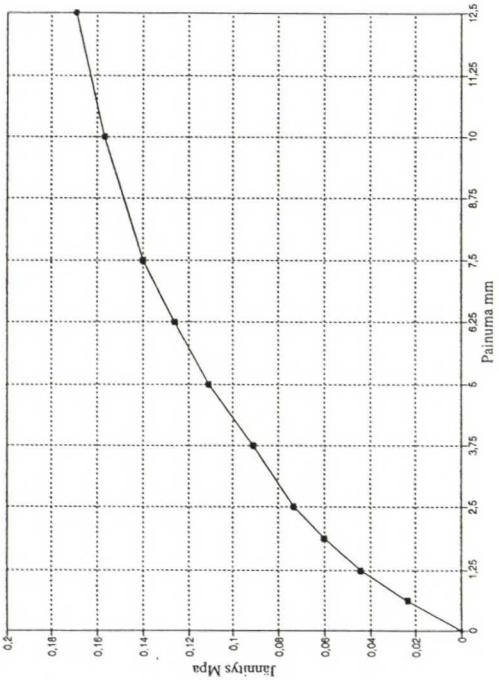
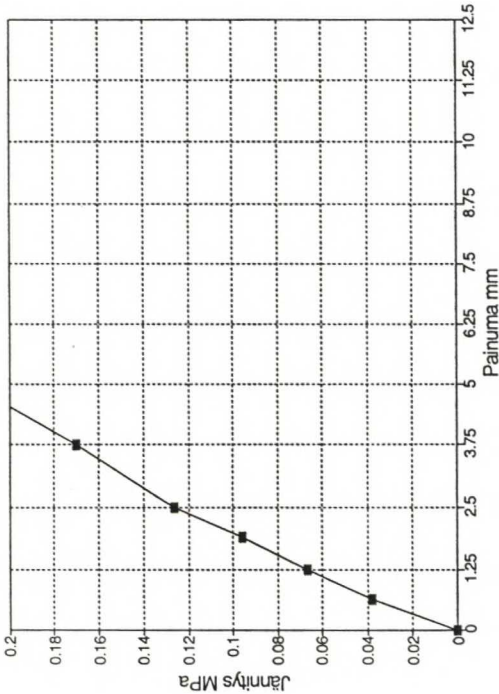
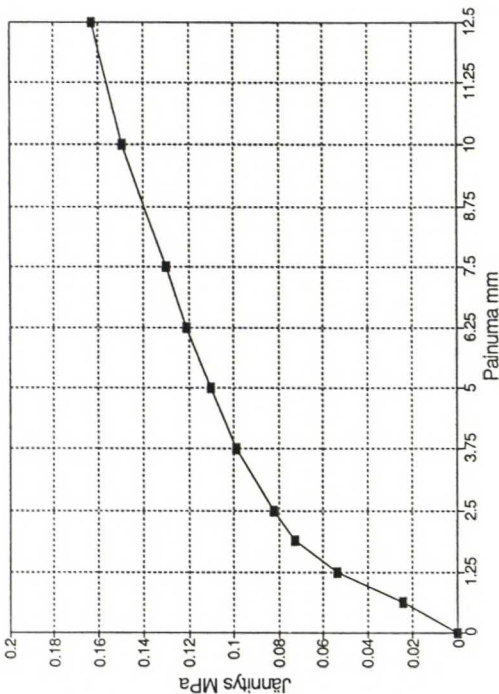
Kontula, vesiupotus



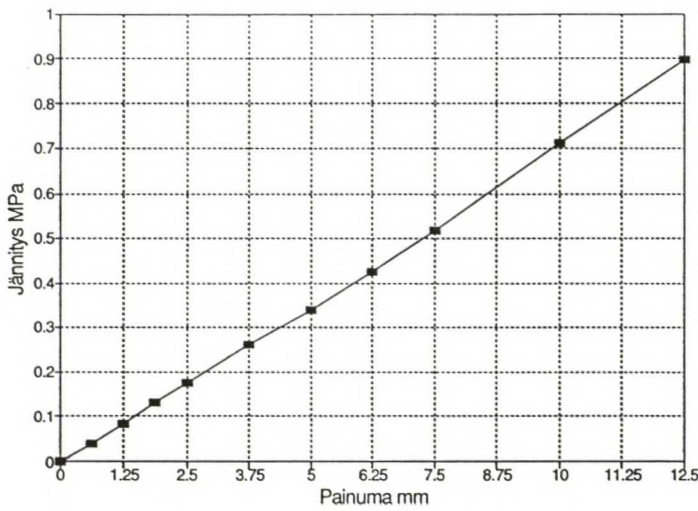
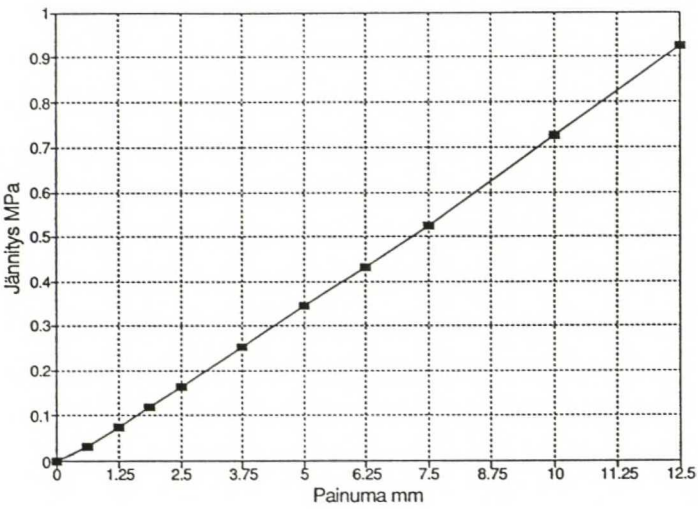
Kontula, vesiupotus



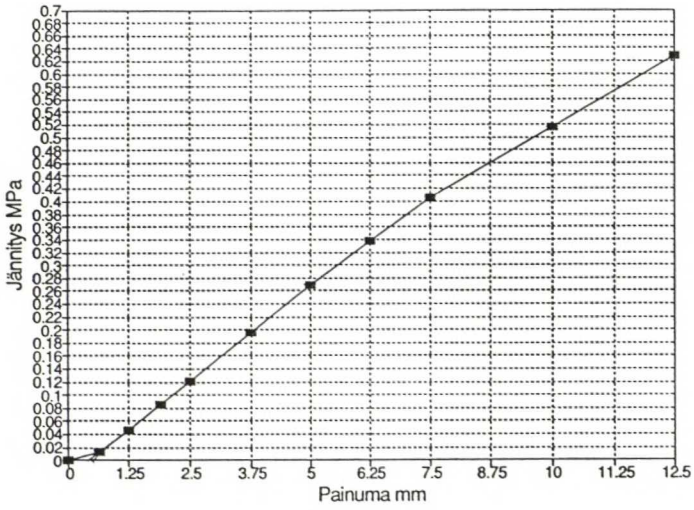
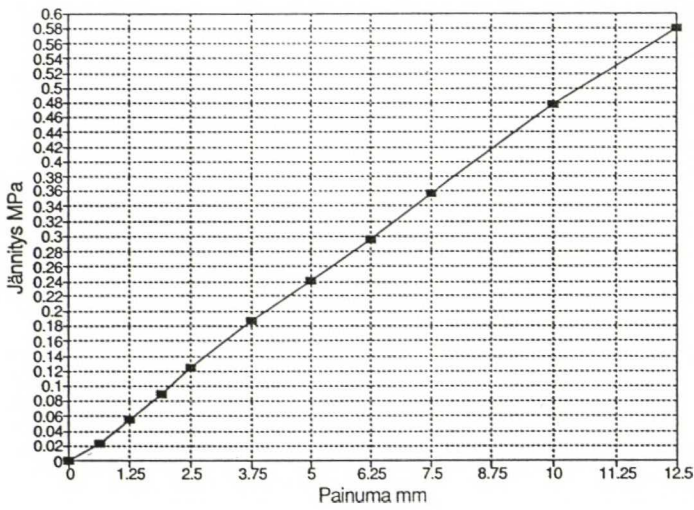
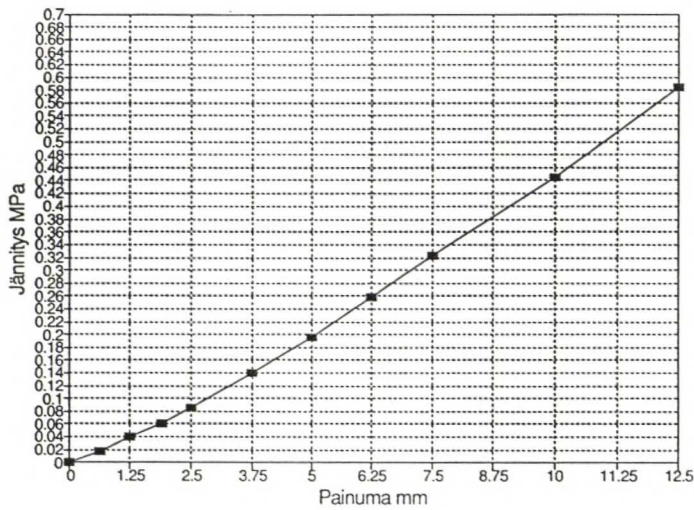
Kontula, luonnontilainen (syvyys 0.5 m)



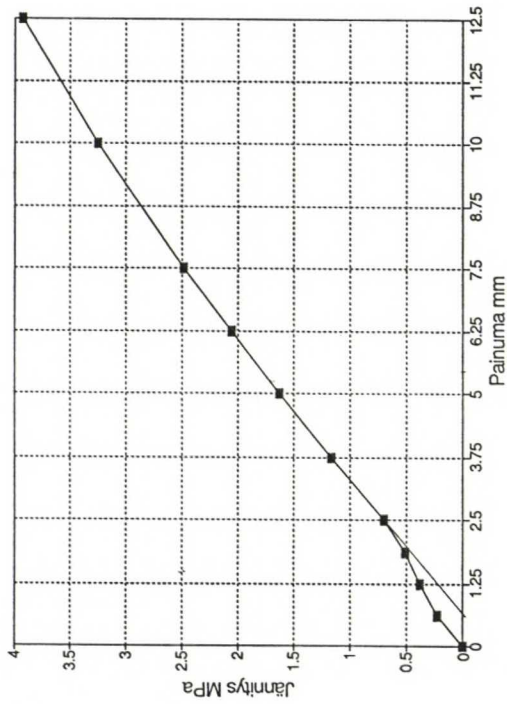
Nummi-Pusula, luonnontilainen



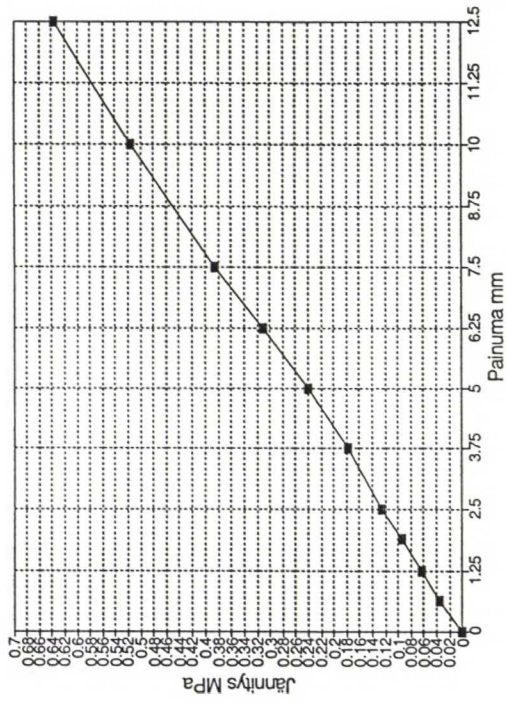
Nummi-Pusula, vesiupotus



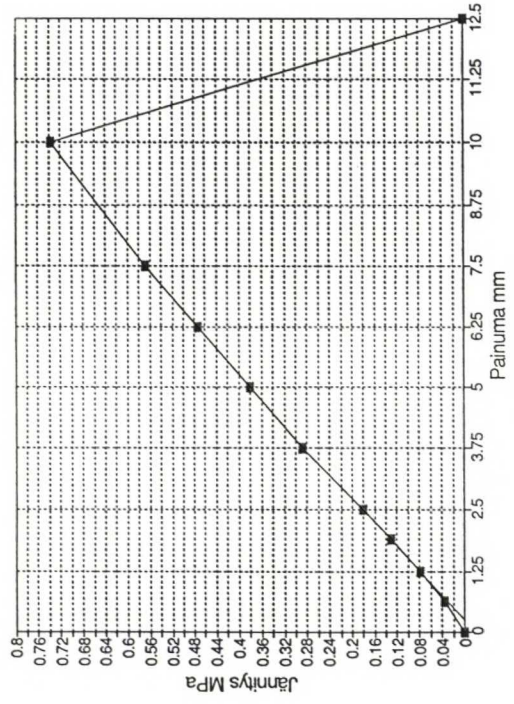
luonn.



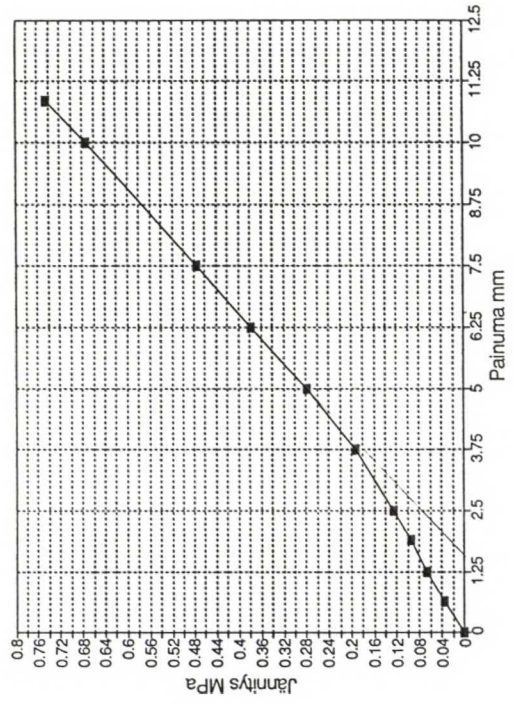
v.u.



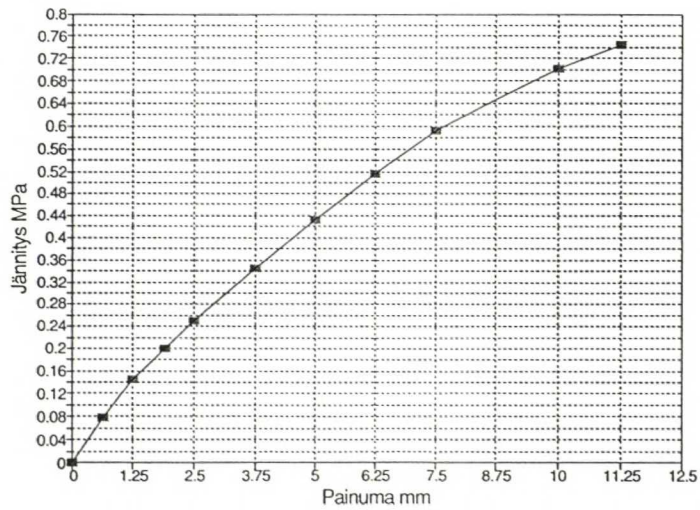
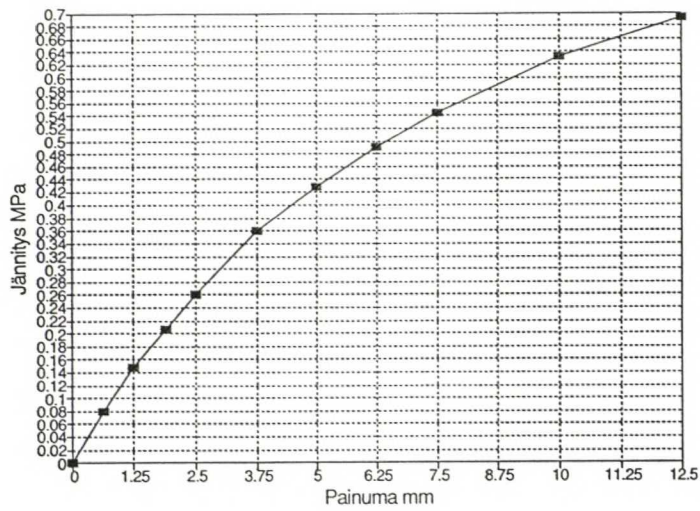
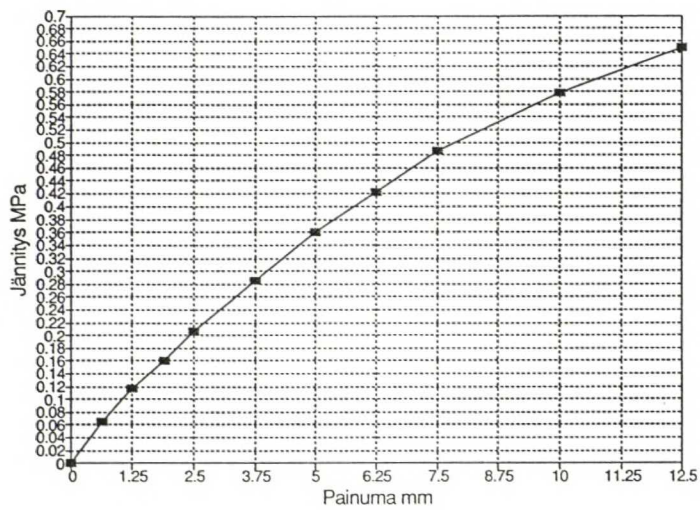
v.u.



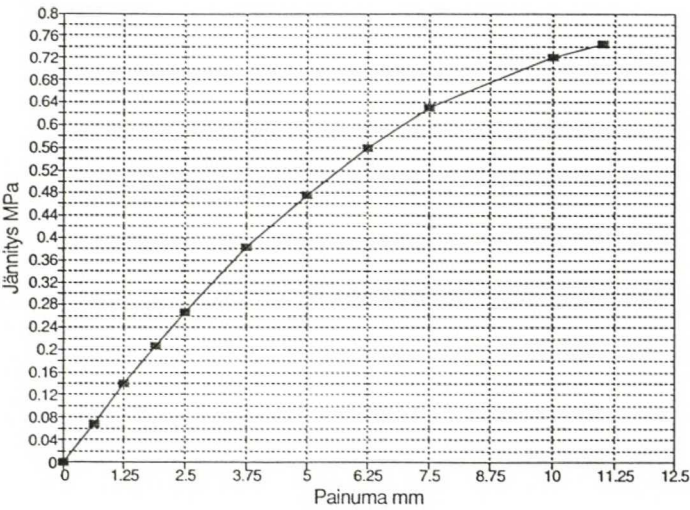
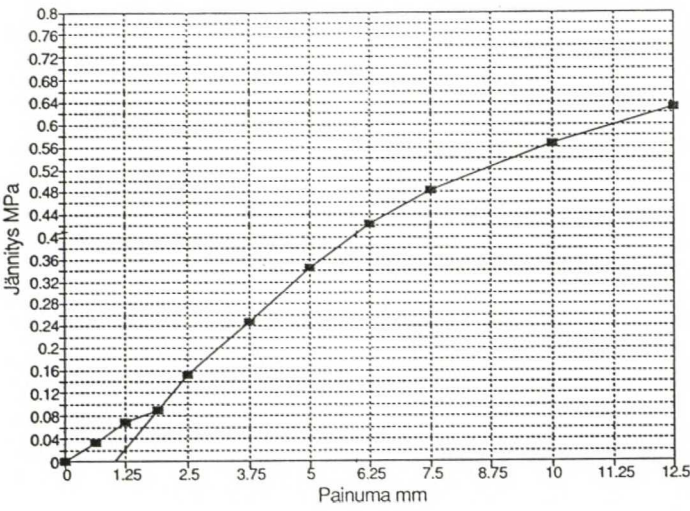
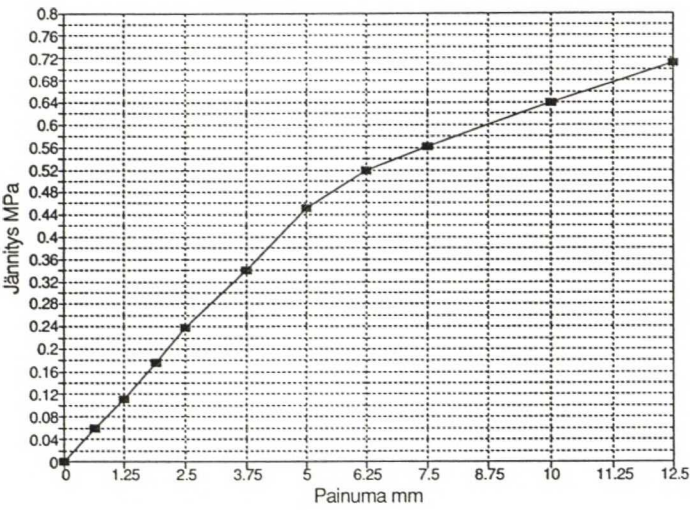
v.u.



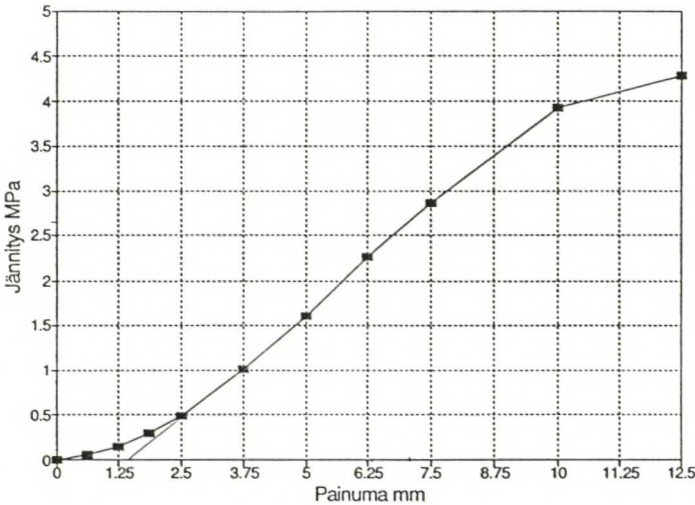
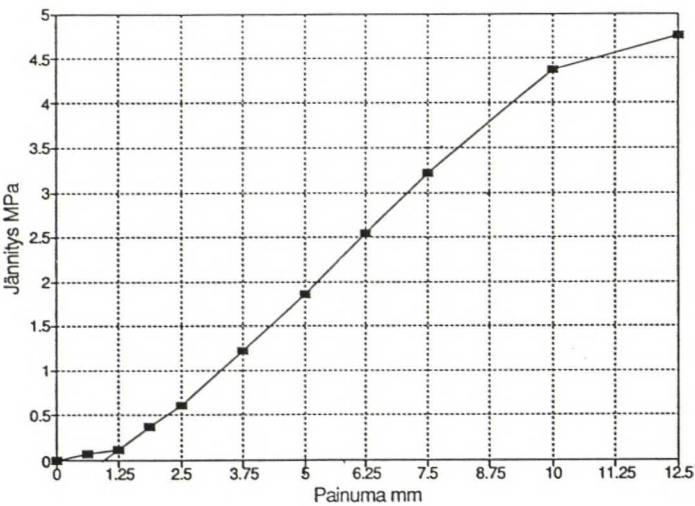
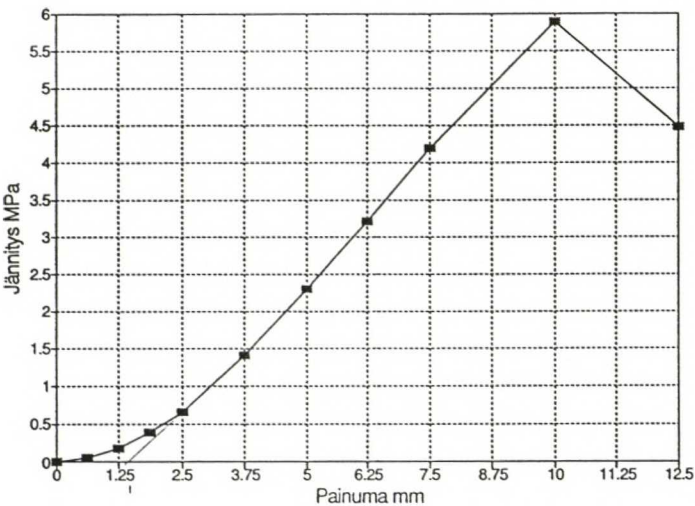
Palojärvi-Olkkala, pl 114+80, luonnontilainen



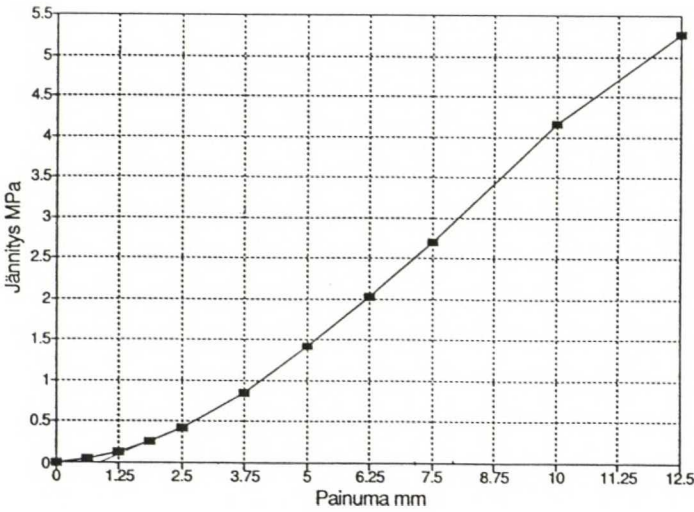
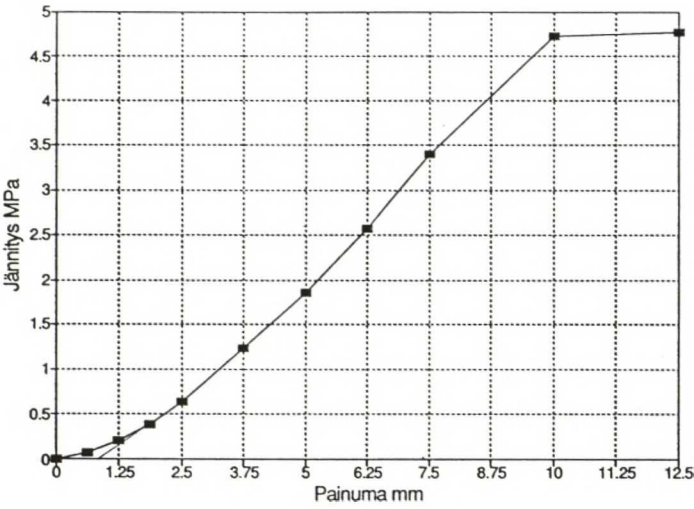
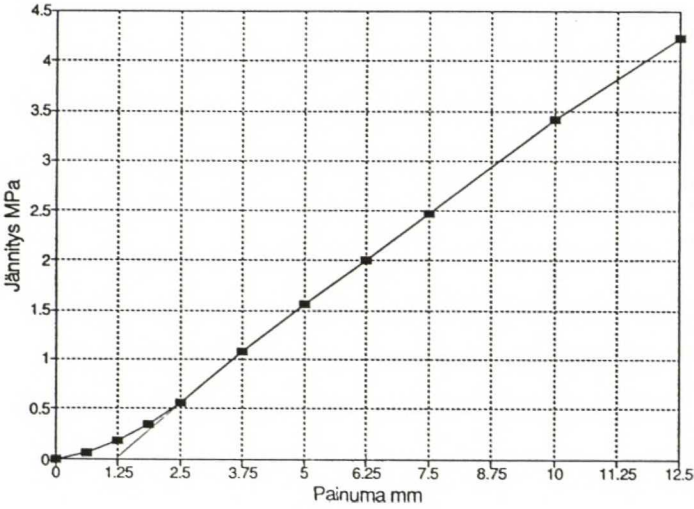
Palojärvi-Olkkala, pl 114+80, vesiupotus



Palojärvi-Olkkala, pl 100+40, luonnontilainen

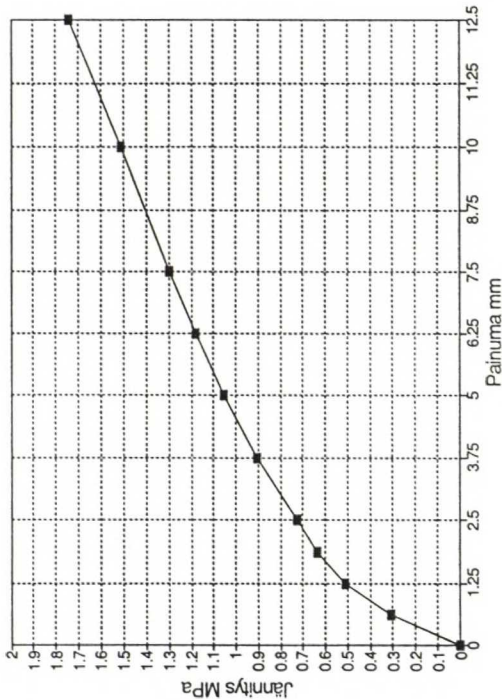


Palojärvi-Olkkala, pl 100+40, vesiupotus

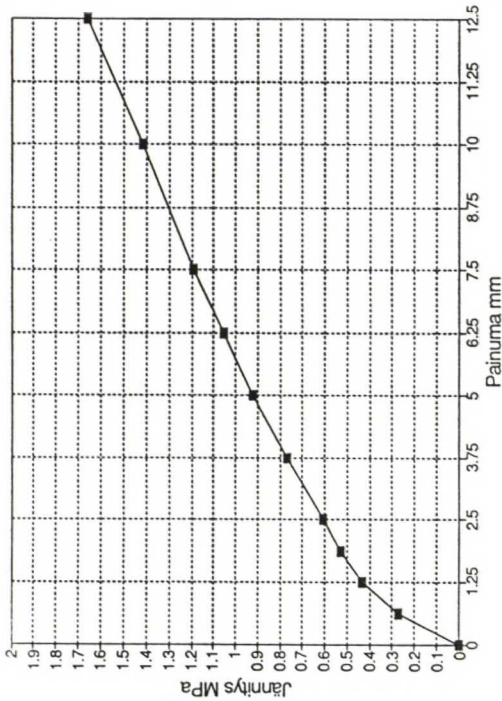


Otaniemi

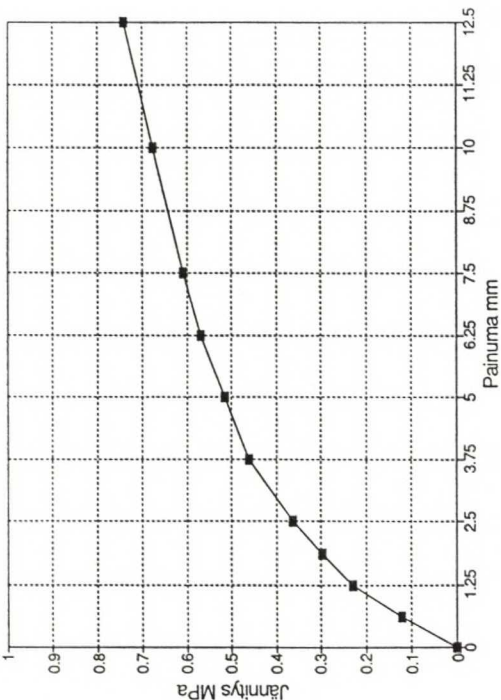
luonn.



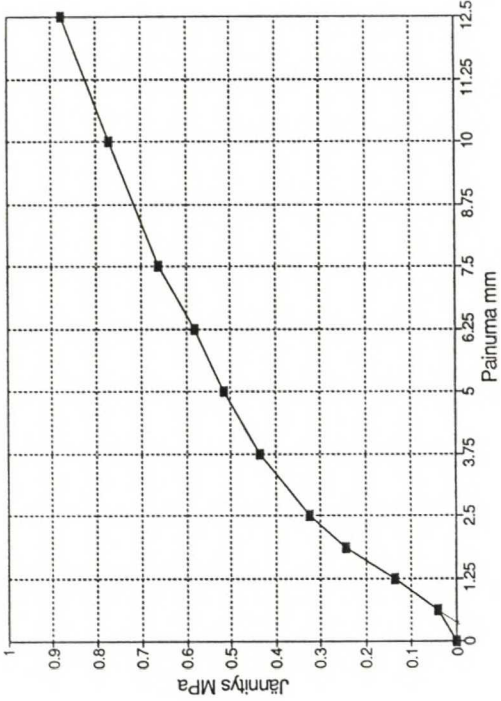
v.u.



v.u.

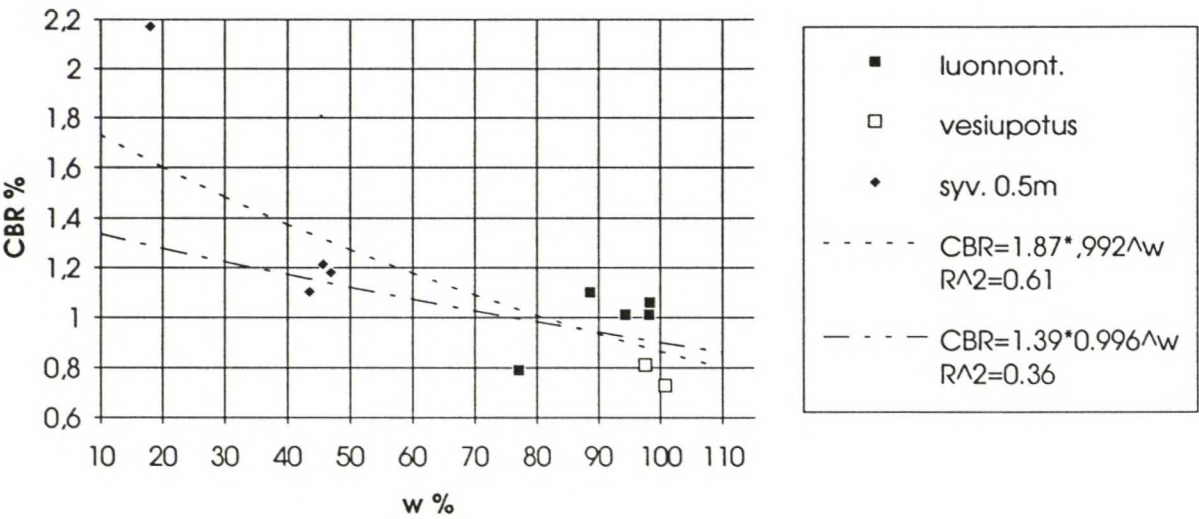


v.u.

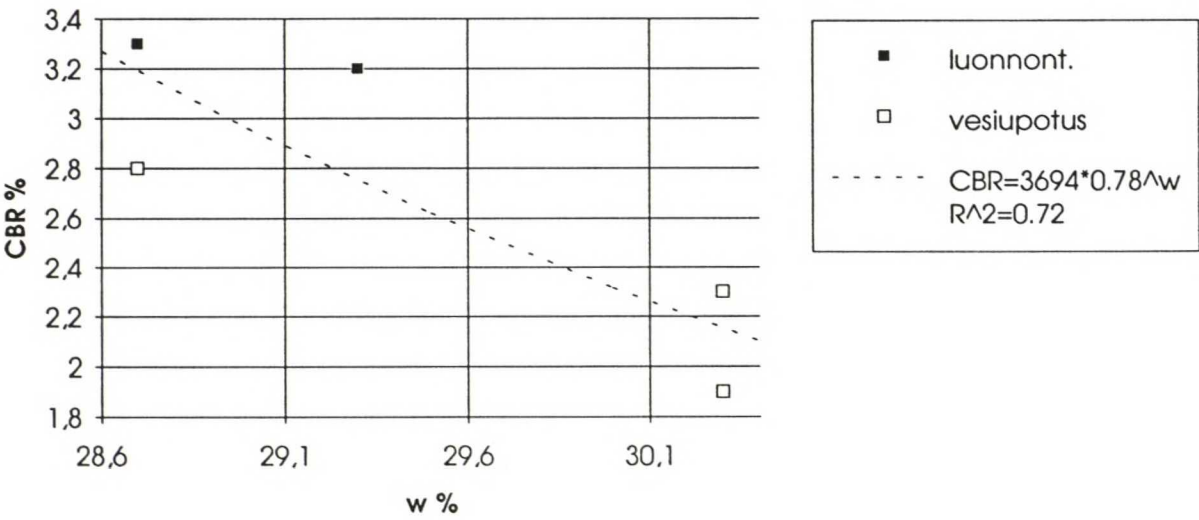


Liite 5. CBR-kokeen tulokset vesipitoisuuden suhteen.

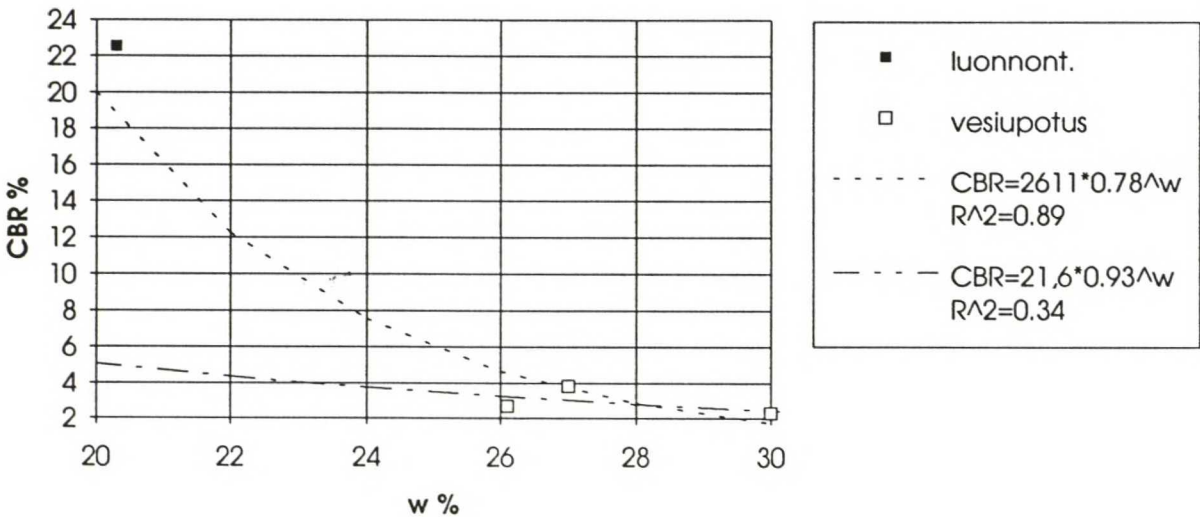
Kontula liSa



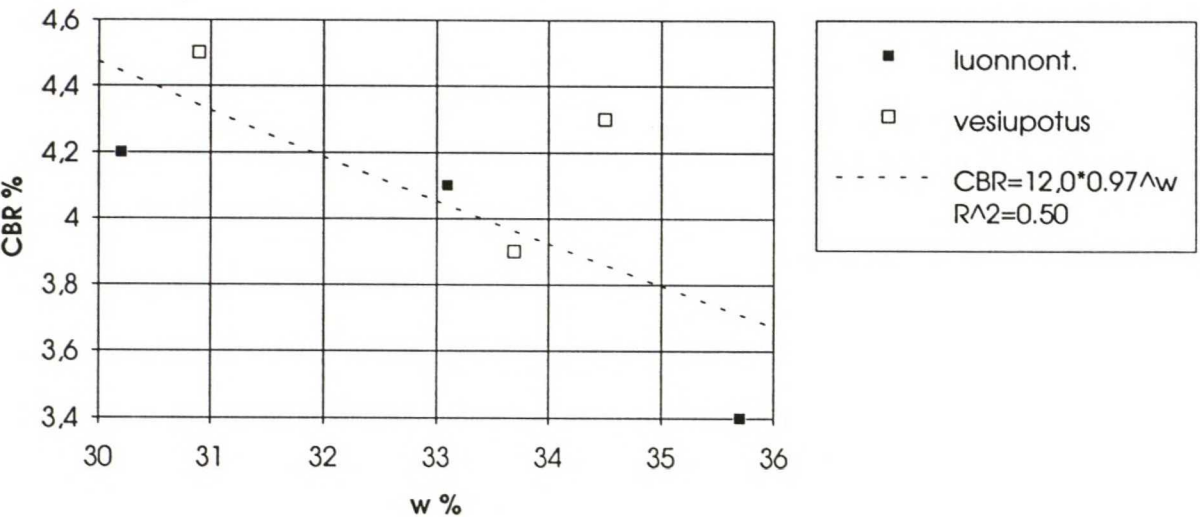
Nummi-Pusula saSi



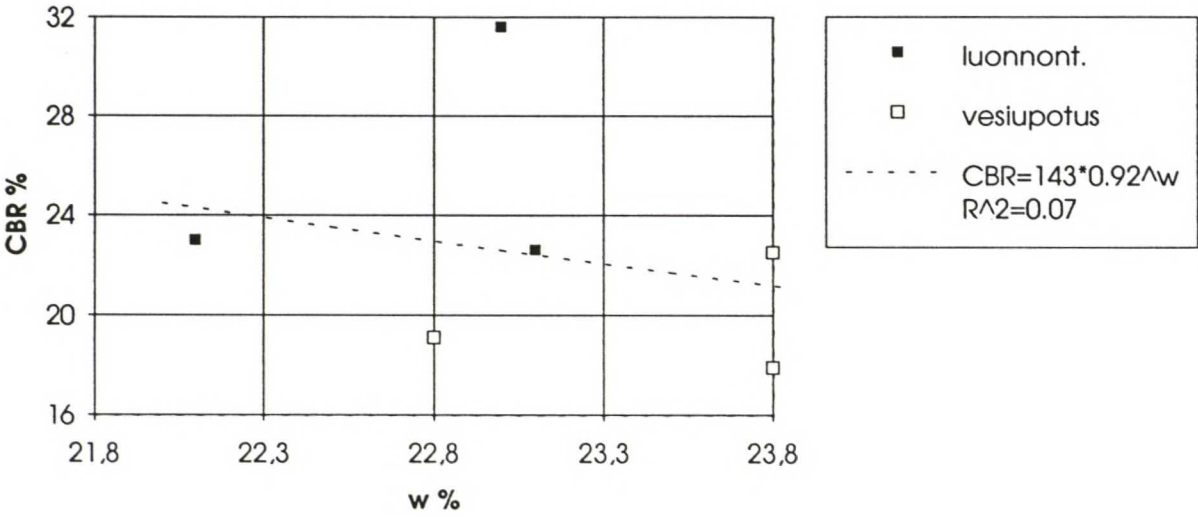
Palojärvi-Oikkala pl 100+17 laSa, kk



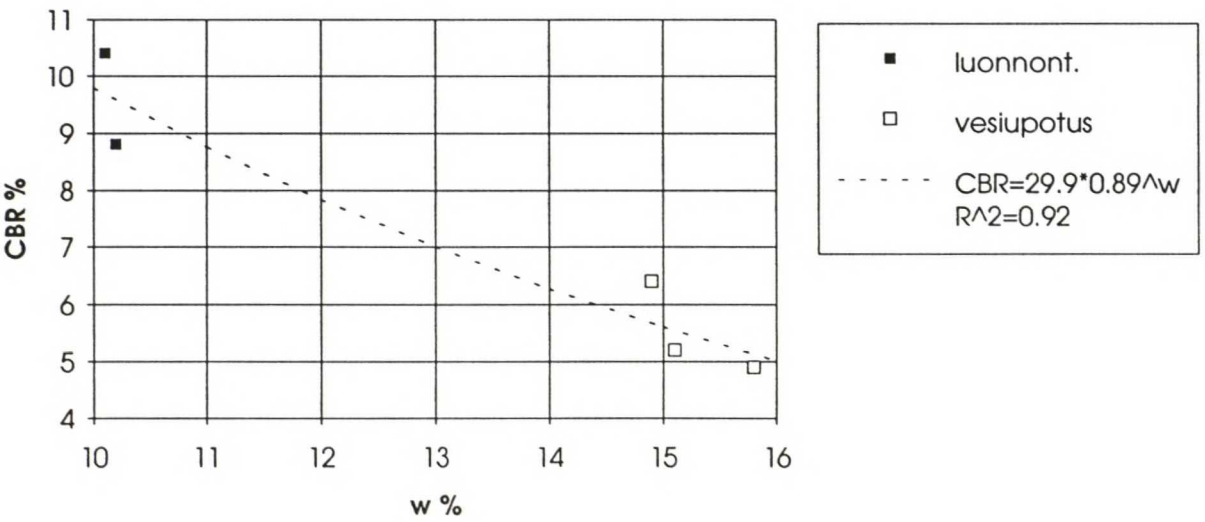
Palojärvi-Oikkala pl 114+80 laSa



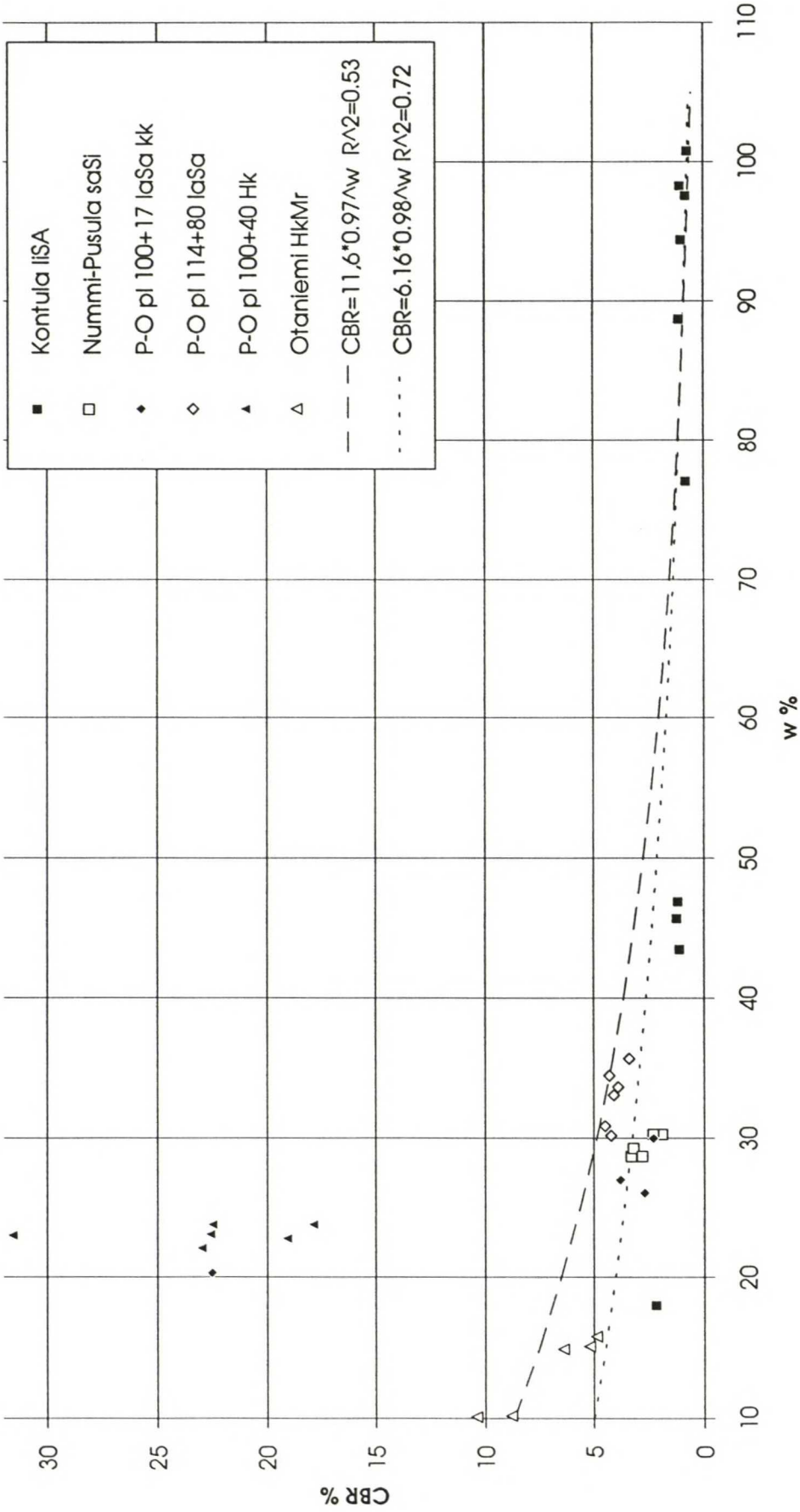
Palojärvi-Olkkala pl 100+40^{si} Hk



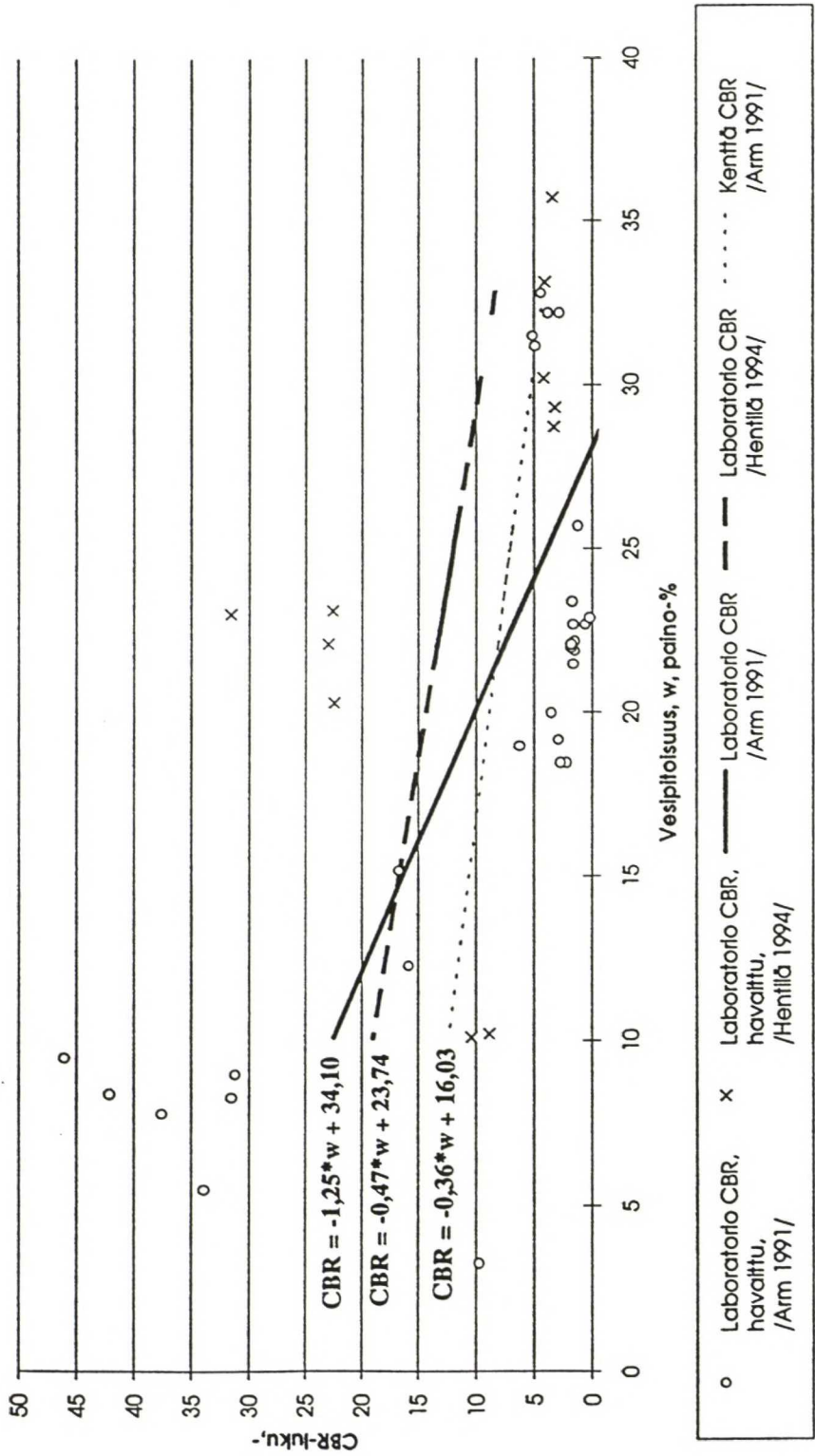
Otaniemi HkMr



Kaikki kohteet

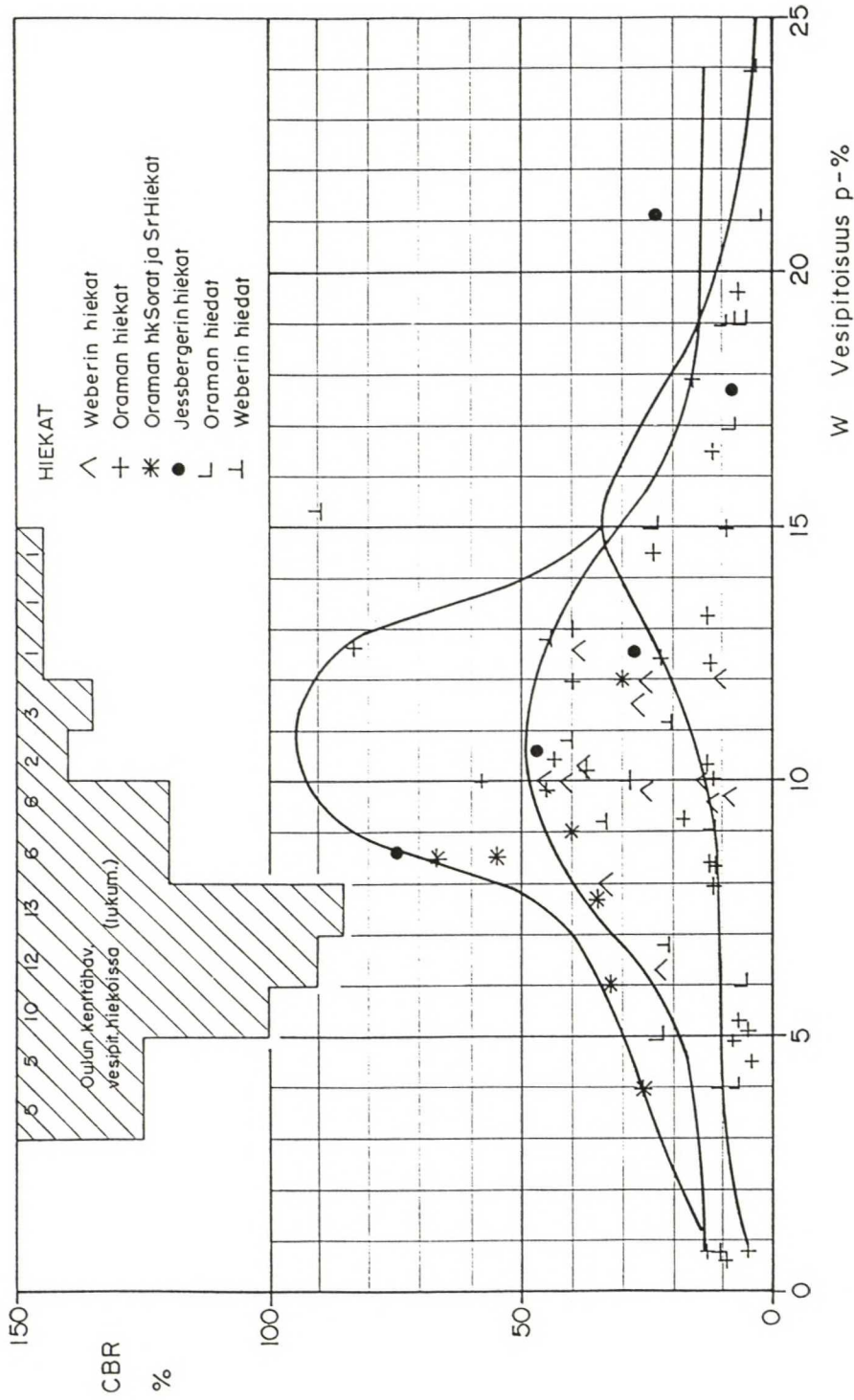


Liite 6. Laboratorio ja kenttä CBR-kokeen tulokset vesipitoisuuden suhteen /Palolahti 1994/.

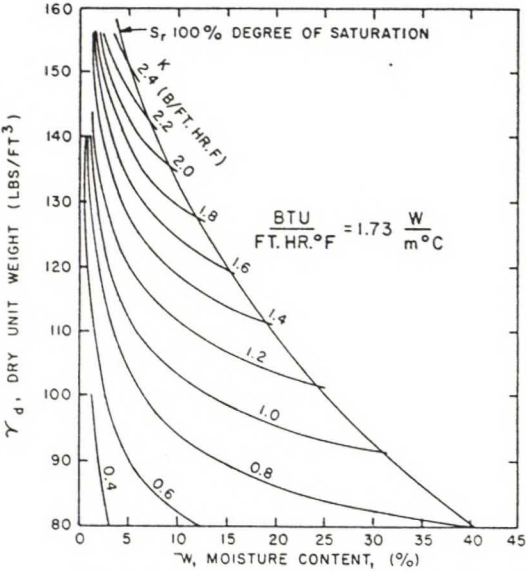


Laboratoriossa luonnontilaista näytteistä määritetyt CBR-luvut vesipitoisuuden suhteen. Kuvaajassa on lisäksi esitetty regressiosuorat sekä laboratorio että kenttä CBR-kokeen ja vesipitoisuuden välillä. Havaintoaineisto lähteistä: Arm 1991 ja Hentilä 1994.

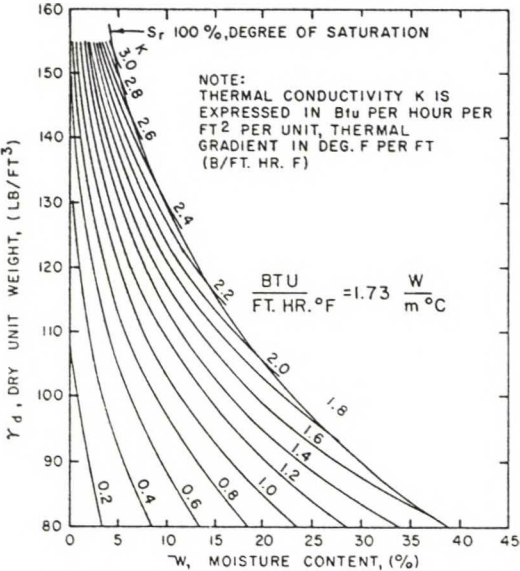
Liite 7. CBR-kokeen tulokset vesipitoisuuden suhteen /Orama 1982/.



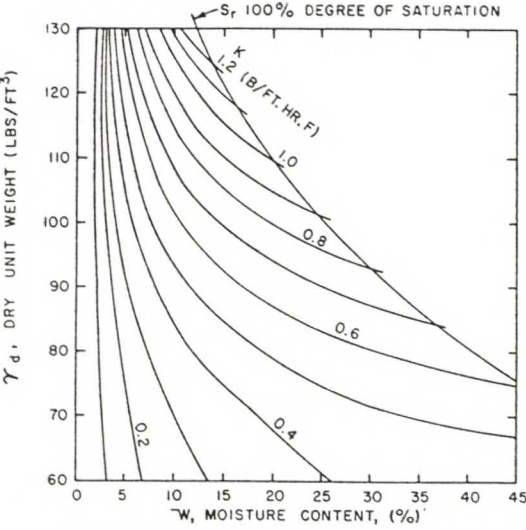
Liite 8. Lämmönjohtavuus kuivatilavuuspainon ja vesipitoisuuden suhteen
/Phukan 1985/.



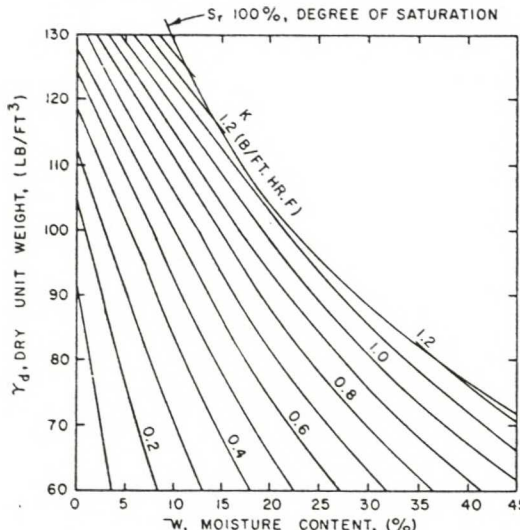
(A) COARSE GRAINED SOILS-UNFROZEN



(A) COARSE GRAINED SOILS-FROZEN



(B) FINE GRAINED SOILS-UNFROZEN



(B) FINE GRAINED SOILS-FROZEN

Liite 9.

Liite 9. Pakkasmäärät, roudan syvyydet ja kertoimen k arvot Kanadan lentokentillä /McCormick 1993/.

TABLE 1
SUMMARY OF FROST DEPTH DATA AT SELECTED CANADIAN AIRPORTS

STATION	PAVEMENT TYPE	DOMINANT SOIL TYPE	WINTER	F. I. (°-days C)	FROST DEPTH (m)	ALPHA
Bagotville	PCC	Sand	1967/68	1667	2.29	0.056
			1968/69	1669	1.90	0.056
			1969/70	1562	2.18	0.053
Calgary	Asphalt	Clay	1964/65	1267	1.70	0.048
			1965/66	1248	1.88	0.053
			1966/67	1189	1.91	0.055
Cold Lake	PCC	Sand	1967/68	1539	2.36	0.060
			1968/69	2164	2.90	0.062
			1964/65	1728	1.96	0.047
Edmonton	PCC	Clay	1965/66	1956	2.49	0.056
			1966/67	1606	1.96	0.049
			1967/68	1214	1.88	0.054
			1968/69	2221	2.51	0.053
			1969/70	1443	2.06	0.054
Fort Nelson	Asphalt	Sand	1964/65	2800	3.28	0.062
			1965/66	2903	3.43	0.064
			1966/67	2974	3.43	0.063
			1967/68	2156	2.97	0.064
			1968/69	2959	3.43	0.063
			1969/70	2085	2.90	0.063
Fort St. John	Asphalt	Clay	1965/66	1211	1.98	0.057
			1966/67	1703	2.95	0.071
			1967/68	1405	2.84	0.076
Gimli	Asphalt	Sand	1967/68	1741	3.00	0.072
			1968/69	1889	3.05	0.070
			1964/65	2204	2.34	0.050
Grande Prairie front of hangar	Asphalt	Clay	1965/66	2064	1.91	0.042
			1966/67	1915	1.80	0.041
			1967/68	1413	1.85	0.049
Grande Prairie Taxiway	Asphalt	Clay	1965/66	2115	1.88	0.041
			1966/67	2009	1.88	0.042
			1967/68	1470	1.90	0.050
Lakehead	Asphalt	Sand	1964/65	1850	1.60	0.037
			1965/66	1286	1.37	0.038
			1966/67	1722	1.60	0.039
			1967/68	1319	1.47	0.040
			1967/68	1139	2.49	0.074
			1968/69	1878	2.82	0.065
			1969/70	1382	2.39	0.064
			1967/68	1144	2.36	0.070
			1968/69	1986	2.92	0.066
Prince Albert	Asphalt	Silt, sandy	1965/66	2507	2.64	0.053
			1967/68	1813	2.31	0.054
			1965/66	2507	3.17	0.063
Prince Albert taxiway	PCC	silt, sandy	1966/67	2544	3.07	0.061
			1967/68	1813	2.82	0.066
			1965/66	956	1.68	0.054
Prince George	Asphalt	Clay	1966/67	873	1.45	0.049
			1967/68	795	1.63	0.058
			1964/65	2331	2.36	0.049
Regina	Asphalt	Clay	1965/66	1781	1.85	0.044
			1966/67	1941	1.83	0.041
			1967/68	1354	1.88	0.051
			1968/69	1706	1.90	0.046
			1969/70	1744	1.88	0.045
			1966/67	2121	1.70	0.037
Saskatoon	Asphalt	Clay	1967/68	1432	1.78	0.047
The Pas	Asphalt	Clay	1964/65	2814	2.64	0.050
			1965/66	1993	2.23	0.050
			1966/67	2879	3.35	0.062
			1967/68	2105	3.10	0.067
			1968/69	2426	2.28	0.066
			1964/65	2296	3.15	0.066
Whitehorse	PCC	Sand	1965/66	2475	3.33	0.067
			1966/67	2494	3.38	0.068
			1967/68	1610	2.95	0.073
			1968/69	2638	3.33	0.065
			1969/70	1337	3.05	0.083
Winnipeg, location 2	PCC	Clay	1964/65	2282	1.90	0.040
			1965/66	2065	2.23	0.049
			1966/67	2178	2.21	0.047
			1967/68	1546	1.88	0.048
			1965/66	1999	1.80	0.040
			1966/67	2178	1.80	0.039
Winnipeg, carpark	Asphalt	Clay	1967/68	1685	1.70	0.041
			1964/65	2255	3.48	0.073
			1965/66	3468	4.16	0.071
Yellowknife	Asphalt	Sand	1966/67	3943	4.11	0.066
			1967/68	866	2.29	0.078

Liite 10. Lentokenttien maaprofiilit sekä pakkasmäärät, roudan syvyydet ja kertoimen k arvot Saskatchewan valtateillä /McCormick 1993/.

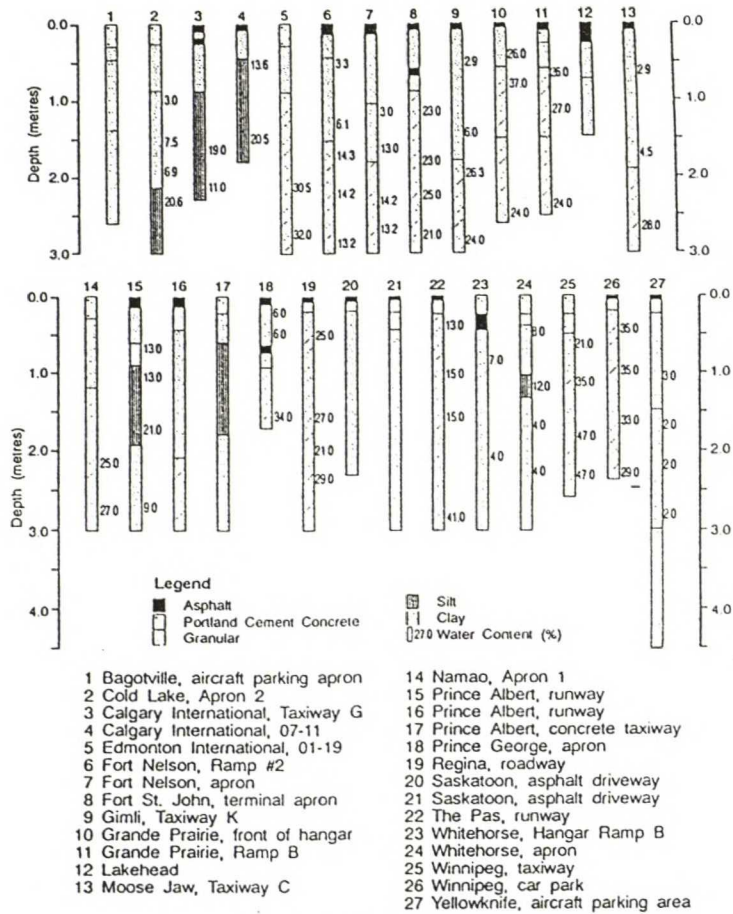


Figure 1 Soil Profiles

TABLE 2
SUMMARY OF FROST DEPTH DATA, SASKATCHEWAN HIGHWAYS

STATION	PAVEMENT THICKNESS (mm)	SOIL TYPE	WINTER	F. I. (°-days C)	FROST DEPTH (m)	ALPHA
23	254	Sand, clayey (SC)	1963/64	2 000	2.46	0.055
			1964/65	2 733	2.67	0.051
24	432	Silt, low plastic (ML)	1963/64	1 722	2.44	0.059
			1964/65	2 417	2.67	0.054
25	254	Silt, low plastic (ML)	1963/64	1 800	1.75	0.041
			1964/65	2 456	2.11	0.043
27	381	Clay, high plastic (CH)	1963/64	1 356	1.96	0.053
			1964/65	2 417	2.46	0.050
28	381	Clay, low plastic (CL)	1963/64	1 011	1.73	0.054
			1964/65	1 900	2.62	0.060
29	406	Clay, low plastic (CL)	1963/64	1 111	1.65	0.050
			1964/65	2 067	2.44	0.054
30	356	Silt, low plastic (ML)	1963/64	1 944	2.16	0.048
			1964/65	2 417	2.51	0.051
31	533	Clay, high plastic (CH)	1963/64	1 444	1.70	0.045
			1964/65	2 306	2.08	0.043
32	533	Clay, high plastic (CH)	1963/64	1 444	1.73	0.045
			1964/65	2 305	2.13	0.044
33	330	Clay, high plastic (CH)	1963/64	1 256	1.80	0.051
			1964/65	2 222	2.31	0.049
34	381	Clay, high plastic (CL)	1963/64	1 444	1.78	0.047
			1964/65	2 306	2.31	0.048
35	406	Clay, low plastic (CL)	1963/64	1 478	1.91	0.050
			1964/65	2 278	2.54	0.053

Liite 11.

Liite 11. Kujalan /1991/ koekappaleiden rakeisuus, ominaispinta-ala, jäätymättömän veden määrä ja routivuustekijät.

Particle-size characteristics of the samples.

SYMBOL	SOIL TYPE	PERCENT PARTICLES FINER THAN			UNIFORMITY COEFFICIENT C=d ₆₀ /d ₁₀	COEFFICIENT OF CURVATURE C=d ₃₀ /d ₁₀ ²	SPECIFIC SURFACE AREA m ² /g
		# < 0.002mm	# < 0.02mm	# < 0.075mm			
O11	heavy clay	69	100	100			16.5
E32	heavy clay	70	98	100			53.0
T60	heavy clay	86	100	100			50.4
T61	heavy clay	80	100	100			35.3
T66	heavy clay	86	98	100			31.7
V73	heavy clay	64	92	96			31.1
V78	heavy clay	70	92	100			41.1
V79	heavy clay	63	82	100			12.9
T100	heavy clay	86	100	100			39.4
E33	lean clay	46	92	100			11.8
H44B	lean clay	34	62	79			17.3
H69	lean clay	36	89	100			28.7
V72	lean clay	45	94	100			29.5
O95	lean clay	45	98	100			7.5
V96	lean clay	34	76	100			20.6
V98	lean clay	34	98	100			20.6
O13	clayey silt	19	100	100	4.0	1.49	7.6
L15	clayey silt	18	70	100			5.2
L16	clayey silt	18	70	100			5.2
L17	clayey silt	18	69	100			5.2
K34	clayey silt	20	94	100	3.9	0.90	5.1
H44A	clayey silt	24	59	79	192.3	0.21	10.1
O48	clayey silt	10	44	72	20.0	1.08	5.9
O56	clayey silt	18	72	100			9.2
O57	clayey silt	19	72	95			17.8
E75	clayey silt	12	53	100	15.0	2.11	1.4
E80	clayey silt	26	70	100			12.0
J37	clayey silt	14	59	100	22.0	4.19	2.8
L14	silt	9	48	100	15.0	0.40	3.3
J36	silt	0	49	100	3.1	1.10	2.9
O49A	silt	7	30	54	26.3	1.05	3.8
S91	sandy silt	0	28	75	5.4	1.05	1.9
O9	sandy silt	4	15	72	9.0	3.63	0.8
S90	sandy silt	0	30	65	9.6	0.74	1.0
T61K	sandy silt	0	40	98	8.3	0.65	
T61S	sandy silt	0	31	98	5.8	0.69	
H44BS	sandy silt	0	23	62	6.5	0.92	
O10	silty sand	0	1	61	2.4	1.47	0.8
O31	silty sand	0	10	35	5.6	1.23	2.5
H46A	silty sand	14	26	44	233.3	9.30	18.8
O47	silty sand	4	22	56	13.5	1.53	2.4
O49B	silty sand	11	30	48	96.2	2.46	5.0
O49C	silty sand	8	18	36	51.4	3.97	1.9
O55E	silty sand	8	21	40	32.0	0.32	2.2
H92	silty sand	0	14	40	12.3	1.10	1.2
O55C	sand	5	10	23	9.5	2.63	5.2
V101	sand	0	0	3	1.7	0.95	3.3
O54A	sand	8	16	28	46.7	6.11	5.2
O55D	sand	5	10	18	15.0	2.80	2.9
O116	sand	0	0	2	1.8	0.53	
R113	silt till	13	45	72	30.8	1.56	11.8
O54B	silty sand till	6	18	34	27.7	2.31	2.0
H94	silty sand till	0	4	16	100.0	0.25	7.1
S1	silty sand till	8	18	36	83.3	2.70	10.6
K3	silty sand till	4	20	44	36.9	1.03	1.0
P5	silty sand till	7	24	34	200.0	1.13	3.8
P51	silty sand till	5	18	35	24.4	1.26	2.9
H93	silty sand till	0	17	41	16.7	0.67	1.8
K110	silty sand till	8	18	34	65.1	2.08	5.0
R114	silty sand till	3	25	42	8.3	1.05	3.6
P115	silty sand till	11	28	41	113.9	1.69	4.1
P52	sand till	3	13	28	20.0	1.93	2.9
R8	sand till	0	11	24	32.3	1.37	2.0
K111	sand till	3	10	17	36.8	2.44	1.9
R112	sand till	4	18	31	62.5	1.23	1.7
K2	gravelly sand till	0	7	22	71.4	0.35	0.6
K50	gravelly sand till	0	4	13	3.6	0.56	0.4
P4	sandy gravel till	0	0	8	74.0	0.34	1.7

Table 3. Parameters b and c of equation (25), used to indicate the amount of unfrozen water as a function of temperature, temperatures at which the unfrozen water content is 15% and 50% of total water in the sample, and the proportion of unfrozen water of total water content at temperatures of -2.0°C and -2.5°C .

Symbol	Soil type	Parameters		Temperatures at which		Unfrozen water at temperatures	
		b	c	15% Unfr. water	50% Unfr. water	$\alpha_{T=-2.0^{\circ}\text{C}}$	$\alpha_{T=-2.5^{\circ}\text{C}}$
		$^{\circ}\text{C}$		$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$		
O11	heavy clay	-2.31	1.58	-3.46	-1.83	0.451	0.322
E32	heavy clay	-2.65	1.99	-3.66	-2.20	0.564	0.411
T61	heavy clay	-1.55	1.40	-2.45	-1.19	0.240	0.142
H69	lean clay	-1.44	2.63	-1.84	-1.25	0.093	0.014
V72	lean clay	-1.30	1.42	-2.04	-1.00	0.158	0.080
V98	lean clay	-1.38	2.67	-1.75	-1.06	0.052	0.008
O13	clayey silt	-2.40	2.06	-3.27	-2.01	0.504	0.337
L17	clayey silt	-1.37	1.68	-2.01	-1.10	0.151	0.064
K34	clayey silt	-2.02	2.75	-2.50	-1.77	0.378	0.165
H44A	clayey silt	-1.87	1.73	-2.72	-1.52	0.325	0.191
O48	clayey silt	-1.59	3.57	-1.90	-1.44	0.226	0.112
O56	clayey silt	-1.47	1.22	-2.48	-1.09	0.233	0.148
E75	clayey silt	-0.98	2.25	-1.30	-0.83	0.007	0.000
L14	silt	-1.05	2.55	-1.35	-0.91	0.006	0.000
O49A	silt	-1.79	2.85	-2.24	-1.57	0.254	0.075
O9	sandy silt	-1.56	2.71	-1.98	-1.36	0.141	0.028
S90	sandy silt	-1.72	3.14	-2.10	-1.52	0.200	0.039
O10	silty sand	-1.56	2.71	-1.98	-1.36	0.141	0.028
O31	silty sand	-0.95	2.09	-1.29	-0.80	0.009	0.001
H46A	silty sand	-1.28	1.65	-1.89	-1.03	0.124	0.049
O47	silty sand	-1.63	2.77	-2.05	-1.43	0.172	0.038
O54A	sand	-1.19	1.60	-1.79	-0.95	0.015	0.000
H94	silty sand till	-1.62	2.50	-2.10	-1.40	0.184	0.052
S1	silty sand till	-1.99	2.05	-2.68	-1.62	0.364	0.203
K3	silty sand till	-1.46	2.35	-1.92	-1.25	0.123	0.029
P51	silty sand till	-1.34	2.02	-1.81	-1.10	0.106	0.029
H93	silty sand till	-1.34	1.80	-1.91	-1.09	0.128	0.046
R8	sand till	-1.48	1.69	-2.16	-1.19	0.190	0.088
K2	gravelly sand till	-1.11	2.02	-1.52	-0.93	0.037	0.006
P4	sandy gravel till	-1.40	2.41	-1.83	-1.20	0.094	0.017

Table 4. Results of constant temperature frost heave tests.

SYMBOL	SOIL TYPE	FROST HEAVE RATE	FROST HEAVE	FROST HEAVE RATIO		SEGREGATION POTENTIAL
		v_{max} mm/h	h_{max} mm	h_{2d}/H	h_{max}/H	SP mm ² /Kh
O11	heavy clay	0.42	19.8	0.46	0.65	9.1
E32	heavy clay	0.39	22.7	0.36	0.54	10.1
T60	heavy clay	0.31	20.6	0.49	0.82	11.9
T61	heavy clay	0.22	16.7	0.33	0.46	6.4
T66	heavy clay	0.09	10.1	0.15	0.24	3.8
V73	heavy clay	0.31	16.7	0.57	0.81	6.0
V78	heavy clay	0.21	20.2	0.55	0.72	9.3
V79	heavy clay	0.52	31.0	0.40	0.58	14.2
T100	heavy clay	0.17	9.8	0.09	0.18	4.4
E33	lean clay	0.30	22.1	0.24	0.47	10.0
H44B	lean clay	0.42	28.6	0.45	0.74	9.2
H69	lean clay	0.19	15.0	0.33	0.51	3.3
V72	lean clay	0.17	13.6	0.27	0.35	3.4
O95	lean clay	0.12	12.8	0.29	0.32	3.9
V96	lean clay	0.27	17.2	0.24	0.37	7.2
V98	lean clay	0.08	4.4	0.11	0.14	2.0
O13	clayey silt	0.36	30.1	0.38	0.43	10.2
L15	clayey silt	0.18	15.7	0.21	0.23	4.2
L16	clayey silt	0.06	4.9	0.11	0.12	1.8
L17	clayey silt	0.10	7.3	0.10	0.14	2.1
K34	clayey silt	0.19	12.2	0.08	0.21	5.5
H44A	clayey silt	0.34	18.8	0.22	0.31	9.3
O48	clayey silt	0.16	18.2	0.25	0.30	5.5
O56	clayey silt	0.22	20.2	0.24	0.32	6.7
O57	clayey silt	0.50	27.4	0.35	0.44	11.5
E75	clayey silt	0.08	3.2	0.04	0.05	0.9
E80	clayey silt	0.25	18.7	0.20	0.35	5.9
J37	clayey silt	0.32	24.7	0.21	0.35	8.8
L14	silt	0.15	7.0	0.06	0.04	2.2
J36	silt	0.09	7.3	0.11	0.13	3.7
O49A	silt	0.23	9.7	0.13	0.15	6.9
S91	sandy silt	0.09	4.6	0.05	0.06	3.6
O9	sandy silt	0.01	0.1	0.01	0.01	0.1
S90	sandy silt	0.08	4.7	0.13	0.16	3.1
T61K	sandy silt	0.28	15.1	0.30	0.39	6.5
T61S	sandy silt	0.08	7.4	0.44	0.48	1.1
H44BS	sandy silt	0.14	9.9	0.12	0.15	5.3
O10	silty sand	0.01	0.1	0.01	0.01	0.1
O31	silty sand	0.01	0.7	0.00	0.01	0.2
H46A	silty sand	0.11	4.4	0.02	0.04	1.2
O47	silty sand	0.03	6.6	0.11	0.12	1.6
O49B	silty sand	0.11	6.9	0.09	0.10	4.8
O49C	silty sand	0.03	2.3	0.02	0.03	1.5
O55E	silty sand	0.07	4.5	0.06	0.06	1.9
H92	silty sand	0.10	6.0	0.11	0.14	3.3
O55C	sand	0.01	1.2	0.02	0.02	0.6
V101	sand	0.02	1.0	0.01	0.00	0.1
O54A	sand	0.06	4.0	0.04	0.06	1.5
O55D	sand	0.01	1.2	0.01	0.02	0.2
O116	sand	0.01	0.1	0.01	0.01	0.0
R113	silt till	0.18	7.8	0.08	0.13	4.1
O54B	silty sand till	0.04	7.8	0.11	0.12	1.5
H94	silty sand till	0.10	3.3	0.05	0.06	1.5
S1	silty sand till	0.19	12.8	0.01	0.15	6.2
K3	silty sand till	0.07	6.4	0.06	0.07	3.5
P5	silty sand till	0.10	8.2	0.08	0.12	2.8
P51	silty sand till	0.14	12.0	0.16	0.20	5.6
H93	silty sand till	0.03	3.9	0.05	0.08	1.7
K110	silty sand till	0.08	5.6	0.08	0.09	4.9
R114	silty sand till	0.23	17.5	0.19	0.25	5.6
P115	silty sand till	0.12	6.5	0.08	0.11	5.1
P52	sand till	0.11	7.3	0.12	0.12	3.4
R8	sand till	0.15	10.6	0.05	0.12	3.7
K111	sand till	0.03	1.8	0.02	0.03	1.2
R112	sand till	0.05	3.6	0.05	0.06	2.9
K2	gravelly sand till	0.07	3.6	0.03	0.05	1.3
K50	gravelly sand till	0.01	0.8	0.01	0.01	0.1
P4	sandy gravel till	0.02	0.9	0.01	0.01	0.4